Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского

Выпуск 699

Научное рецензируемое издание

2026 г.

Выходит с 1942 года

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

Редакционный совет

Председатель:

начальник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского

доктор воен. наук **А. Н. Нестечук**

Члены редакционного совета:

С. В. Буг – *доктор пед. наук, проф.* (Михайловская военная артиллерийская академия);

В. П. Гаенко – *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации* (12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации);

А. М. Гончаров – *доктор воен. наук, проф.* (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»);

М. А. Еремеев – *доктор техн. наук, проф.* (Московский технологический университет);

А. В. Кузичкин – *доктор техн. наук, проф.* (Научно-исследовательский институт телевидения);

А. В. Сержантов – *доктор воен. наук, проф.* (Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации);

Б. В. Соколов – *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации* (Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук);

К. Г. Ставров – *доктор техн. наук, проф.* (Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт)

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Кулешов**

Редколлегия:

председатель **Ю. В. Кулешов,** *доктор техн. наук, проф.;*

зам. председателя **И. В. Сахно,** *доктор техн. наук, проф.;*

ответственный секретарь **А. Л. Федер,** *доктор воен. наук, доц.;*

Н. Ф. Аверкиев, *доктор техн. наук, проф.;* **В. Ф. Алексеев,** *доктор техн. наук, проф.;*

Т. В. Алексеев, *доктор ист. наук, доц.;* **А. П. Алёшкин,** *доктор техн. наук, проф.;*

В. Н. Арсеньев, *доктор техн. наук, проф.;* **С. А. Багрецов**, *доктор техн. наук, доктор экон. наук, проф.*;

Е. В. Басотин, *доктор техн. наук, доц.*; **Д. Н. Бирюков,** *доктор техн. наук, проф.;*

И. А. Готюр, *доктор техн. наук, проф.;* **И. В. Грудинин**, *доктор воен. наук, проф.*;

А. П. Доронин, *доктор техн. наук, проф.;* **В. Л. Дорохов**, *доктор воен. наук, доц.;*

И. Ю. Еремеев, *доктор техн. наук, проф.;* **Б. Д. Казахов,** *доктор воен. наук, проф.;*

В. В. Клейменов, *доктор техн. наук, проф.;* **В. В. Козлов,** *доктор техн. наук, проф.;*

Н. С. Кужекин, *кандидат филос. наук, проф.;* **В. Н. Кузьмин,** *доктор воен. наук, проф.;*

Н. Б. Кунтурова, *доктор пед. наук, доц.;* **Е. Л. Лебедев,** *доктор техн. наук, проф.;*

А. Г. Ломако, *доктор техн. наук, проф.;* **А. И. Лоскутов,** *доктор техн. наук, проф.;*

Г. Н. Мальцев, *доктор техн. наук, проф.;* **Е. А. Новиков,** *доктор техн. наук, доц.;*

А. Н. Павлов, *доктор техн. наук, проф.;* **А. В. Паршуткин,** *доктор техн. наук, проф.;*

Д. М. Петров, *доктор экон. наук, доц.;* **С. В. Пилькевич,** *доктор техн. наук, доц.;*

Н. В. Радионов, *доктор экон. наук, проф.;* **Н. А. Репях,** *кандидат филос. наук, доц.;*

К. В. Семенов, *доктор техн. наук, доц.*; **Д. С. Сотник,** *доктор воен. наук;*

С. В. Федулов, *доктор ист. наук, доц.;* **И. В. Фоминов,** *доктор техн. наук, проф.;*

А. В. Чарушников, *доктор воен. наук, проф.*

ISSN 2218-5429

© Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2026

Издание зарегистрировано
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.
Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).
Издание зарегистрировано в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Ответственный за выпуск:
редактор **А. В. Головина**
Технический редактор
и компьютерная верстка: **Е. Е. Лавриенко**
Редактор **М. А. Шихова**

Техническая поддержка:
К. И. Чувирова

Адрес:
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;
тел.: 8 (812) 347-97-05;
http://trudvka.ru

Подписано к печ. 26.03.2026.
Формат печатного листа 320 × 450/2.
Уч.-печ. л. 95,00. Уч.-изд. л. 47,00
Тираж 26 экз. Заказ 4332/127.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Володин Р. С., Кадочников А. П., Пророк В. Я., Цыбульник А. Н. Моделирование пассивных информационных средств мониторинга воздушно-космического пространства в условиях воздействия факторов внешней среды 6

Мосин Д. А., Федер А. Л., Чащин С. В. Теоретико-множественная модель оценивания устойчивости автоматизированных систем в дуэльной ситуации «объект – нарушитель» 19

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Белянкин П. В., Жуков Е. Т. Развитие методов передачи времени через радиостанции дальней навигации и связи 35

Бердюгин И. С., Косырев А. В. Вероятностная модель процесса изменения состояния техники в системе технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления 49

Богданов А. В., Максимович С. В., Толмачев А. А., Федер А. Л., Чижевский Р. Д. Метод всеракурсного и всевысотного распознавания типа одиночной, типового состава групповой воздушной цели в различных видах боевых порядков при нестационарном наблюдении сигналов вторичной модуляции в импульсно-доплеровской радиолокационной системе 60

Бурцев Ю. В., Колковский Ю. В. Наземная экспериментальная отработка высокодетального радиолокационного комплекса с синтезированной апертурой космического базирования методом обращенного эксперимента 71

Возмищев И. Ю., Грязнова К. С., Манухов И. Г. Модель фазовых экранов для задач исследования эффективности работы адаптивных оптических систем 80

Вознюк В. В., Маслик А. Г. Алгоритм модификации хаотического сигнала с целью обеспечения минимального уровня боковых лепестков его автокорреляционной функции 87

Ефанов А. С. Модель функционирования информационно-телекоммуникационной системы с множественным абонентским радиодоступом 100

Логунов С. В., Мальцев Г. Н., Нахов С. А. Основные соотношения для пересчета фотометрических характеристик космического объекта в энергетические характеристики 111

Миронов А. Н., Ситков Р. А. Системный подход к выбору пункта размещения сложных технических систем на примере объектов наземной космической инфраструктуры 119

Полетаев А. М. Радиолокация Земли из космоса: современное состояние и перспективы развития 129

Прокофьев М. Ю., Чувиров А. А. Методический подход к оцениванию и управлению функциональной надежностью узлов коммутации сетей связи 142

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Щукин Г. Г. Применение параметра «ширина спектра» принимаемого радиолокационного сигнала для распознавания опасных явлений погоды 154

Калюта А. Н. Технологические циклы применения и управления космического аппарата «Метеор-М» .....

Корнеев Б.Н., Левадный Ю.В., Соловьев А.В., Чернов И.В. Способы аэрокосмической оптико-электронной топографической съемки с применением динамических опорных пунктов (мобильных марок) 160

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Андрушкевич Д. В. Методика оценивания степени воздействия новостной информации на целевую аудиторию 178

Бирюков Д. Н., Телишев А. В. Анализ защищенности современных систем контроля и управления доступом 186

Богданов В. С., Лазарев А. А., Паршунин Д. Ю. Метод структурно-функционального анализа единой мультисервисной сети Минобороны России с использованием интеллектуальных многоагентных систем 200

Соловьев И. А., Стельмах С. Ф. Формальные правила и порядок расчета комплексного показателя текущего состояния защищенности объектов информационной инфраструктуры (информатизации) 208

РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ. ВОЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ

Абдурахимов А. А., Денисов А. М., Нечаев И. Ю. Методика выбора орбитальной структуры и обоснования параметров малых космических аппаратов многоспутниковой орбитальной группировки космической системы связи 221

Басотин Е. В., Вивчарь Р. М., Кривоносов А. В., Сааль И. Е. Методика оценивания возможности восполнения запаса морально устаревающих элементов сложной военно-технической системы 231

Загорный С. В., Казимиров А. В., Лашко Р. О. Модель термобарического воздействия взрыва на объекты безопасности при эксплуатации комплекса заправки ракетносителей сжиженным природным газом 246

Иванец М. О., Попов А. М., Ткаченко В. В. Верификация конвейеров обработки данных мультиспектральной космической съемки на основе цветных сетей Петри 268

Кобзарь А. А., Кукушкин И. О., Петухов А. И., Просянников Д. Г. Метод дистанционного диагностирования спектра излучения факела двигательной установки с использованием эталонного источника 276

Краснощёков С. Н., Лукьяненко С. Н., Скворцов Д. В. Определение остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей на основе телеметрических измерений напряжения 281

Краснощёков С. Н., Сиволап В. А., Скворцов Д. В. Обоснование коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника сверхнизкоорбитального малого космического аппарата с двигателем малой тяги 290

ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ,
ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ
ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК

Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С. Формирование военно-профессиональных компетенций как аксиологический императив дополнительных профессиональных программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников 303

Молдованова С. М., Мусиенко С. А. Проблема обеспечения единства фундаментализации и профессиональной направленности содержания инженерного образования в военно-учебных заведениях 309

Потяев П. Ю. Психолого-педагогическая профилактика синдрома полярного напряжения у военнослужащих на основе этнокультурных практик коренных народов Арктики 316

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

Беленович О. В., Тарасов А. В., Федулов С. В. Ленинградская военно-теоретическая школа летчиков – школа героев. Герой Советского Союза гвардии капитан Г. Д. Васильев 324

Муксинов К. Б., Тарасов А. В., Федулов С. В. Боевая деятельность выпускника Военно-теоретической школы Красного воздушного флота П. И. Павлова и его учеников в битве за Ленинград 330

Огородников В. П. Онтологические и гносеологические проблемы искусственного интеллекта 338

Репях Н. А., Хрустова А. Н. Человек, Вселенная, Космос в философских нарративах К. Э. Циолковского 345

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

Громов А. С., Грудинин И. В., Летучев Б. А., Майбуров Д. Г. Интероперабельность как основа новой модели военного искусства: роль формирований космических войск в создании единого информационно-функционального контура 353

Рефераты статей 359

Сведения об авторах 370

Сведения о рецензентах 376

Р. С. Володин[1],
кандидат технических наук;
А. П. Кадочников[2],
кандидат технических наук, доцент;
В. Я. Пророк[3],
доктор технических наук, профессор;
А. Н. Цыбульник[4],
доктор технических наук, профессор
[1-3] Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.
[4] Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
имени маршала Советского Союза Л. А. Говорова, г. Ярославль.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Проведен анализ влияния рефракции радиоволн на возможности пассивных информационных средств мониторинга воздушно-космического пространства. Представлены результаты расчетов дальности прямой видимости и рабочей зоны действия пассивных информационных средств мониторинга в условиях неоднородности внешней среды при сезонных изменениях. Разработанный в среде MATLAB программный комплекс позволил провести многовариантное моделирование и установить количественную зависимость ключевых характеристик от метеопараметров. Показано, что учет рефракционных эффектов позволяет увеличить прогнозируемую дальность обнаружения и площадь рабочей зоны без изменения аппаратной части системы.

Ключевые слова: информационные возможности, пассивные информационные средства мониторинга, воздушно-космическое пространство, распространение радиоволн, коэффициент преломления, рефракция, рабочая зона, дальность прямой видимости.

ВВЕДЕНИЕ

К числу ключевых факторов, оказывающих значительное влияние на возможности пассивных информационных средств мониторинга (ПИСМ) воздушно-космического пространства (ВКП), относятся рефракция и интерференция радиоволн в среде распространения. В большинстве случаев вопросы интерференции и рефракции рассматриваются независимо друг от друга и представляются в виде электромагнитной волны, распространяющейся равномерно и прямолинейно. Это приводит к значительным погрешностям при прогнозировании рабочих характеристик ПИСМ, таких как дальность прямой видимости и площадь рабочей зоны. В частности, отсутствие методических подходов, позволяющих количественно оценить вклад отдельных параметров внешней среды (температуры, давления, влажности) в изменение коэффициента преломления атмосферы, не позволяет произвести правильное оценивание пространственных характеристик зоны действия ПИСМ.

В связи с этим актуальной задачей является оценивание влияния рефракции радиоволн на информационные возможности ПИСМ в условиях изменчивой внешней среды. Правильный учет этих явлений особенно важен при решении задач ПИСМ ВКП в широком диапазоне частот. Это объясняется тем, что интерференционная картина радиоволн в начале и конце рабочего диапазона частот ПИСМ может значительно отличаться. Поскольку указанные факторы не могут существовать в природе по отдельности, необходимо провести исследование их совместного влияния на информационные возможности ПИСМ ВКП. Под информационными возможностями будем понимать количественные и качественные показатели, характеризующие потенциальные способности ПИСМ ВКП по обнаружению, оценке параметров сигналов и координат объектов наблюдения в условиях изменяющиеся обстановки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

На информационные возможности ПИСМ ВКП существенно влияет атмосфера, состоящая из основных четырех слоев, различающихся по своим электрическим свойствам: тропосферы (до высоты 10–12 км), стратосферы (до 60–80 км), ионосферы (при высоте более 80 км) и экзосферы (при высоте более 800 км), представленных на рис. 1 [1].

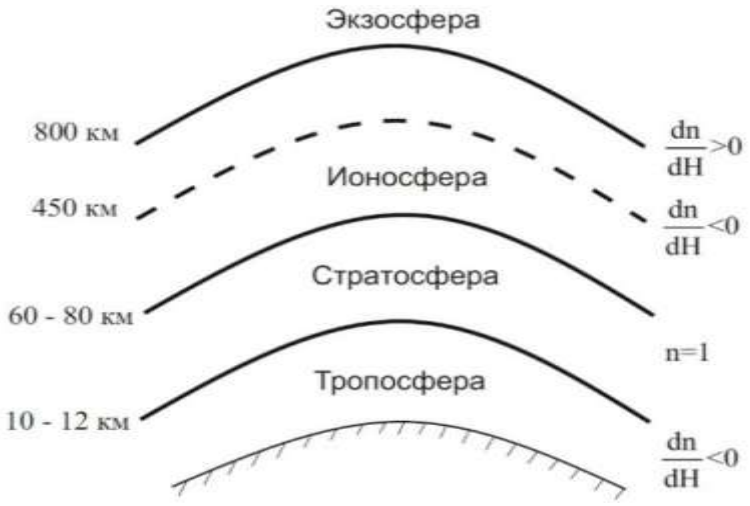


Рис. 1. Структура атмосферы Земли

Магнитная проницаемость в пределах всей атмосферы практически не меняется и принимается $\mu = 1$, диэлектрическую проницаемость можно считать неизменной и равной $\varepsilon = 1$ только в пределах стратосферы. Исходя из этого, самое существенное влияние оказывают тропосфера и ионосфера, которые представляют собой сложную неоднородную среду [1, 2].

Распространение радиоволн по трассе «ПИСМ – объект ВКП» сопряжено с множеством как детерминированных, так и случайных явлений, каждое из которых оказывает влияние на информационные возможности ПИСМ. Одним из важнейших факторов является рефракция, т. е. искривление радиоволн в атмосфере. Радиолуч, проходя через земную атмосферу, подвержен искривлению в результате регулярных изменений коэффициента преломления, что приводит к рефракции радиоволн. Для учета этого явления в специализированной литературе было введено понятие стандартного, или «нормального», состояния атмосферы [3]. Тем не менее, реальные атмосферные условия значительно отличаются от «нормального» состояния, особенно в нижних слоях атмосферы [4].

Влияние тропосферы на распространение радиоволн характеризуется пространственной и временной зависимостью диэлектрической проницаемости от метеопараметров (температуры, давления и влажности воздуха). Для описания электрических свойств атмосферы используется так называемый коэффициент преломления n, связанный с ε соотношением [5]

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon}. \quad (1)$$

Коэффициент преломления воздуха определяется через метеорологические параметры согласно соотношению [6]

$$n = 1 + \frac{1.034 * 10^{-4}}{t + 273.15}\left(p + \frac{220.25 * s * e^{0.06585t}}{t + 273.15}\right), \quad (2)$$

где t – температура воздуха, °С;
p – давление воздуха, мм. рт. ст.;
s – влажность воздуха, %.

Соотношение (2) актуально для высот до 50 км и частот ниже 40 ГГц [7]. На высотах свыше 50 км начинает проявляться влияние ионизации воздуха, тогда как на частотах выше 40 ГГц становится заметной дисперсия радиоволн, вызванная частотной зависимостью коэффициента преломления воздуха, которая связана с резонансными линиями поглощения радиоволн в молекулах водяного пара, кислорода и углекислого газа.

На практике для учета рефракции используется индекс преломления [6]

$$N = (n-1)^{10^6}, \tag{3}$$

где n – коэффициент преломления воздуха.

Индекс преломления определяется в зависимости от высоты наблюдательной точки над земной поверхностью. Для учета применяется слоистая модель атмосферы, представленная на рис. 2. Слоистая модель атмосферы – это упрощенное представление земной атмосферы, в которой свойства (такие как показатель преломления n) изменяются не непрерывно, а скачкообразно на границах условных горизонтальных слоев постоянной толщины. Эта модель используется для упрощения расчетов распространения радиоволн в реальной атмосфере, где n плавно уменьшается с высотой [7].

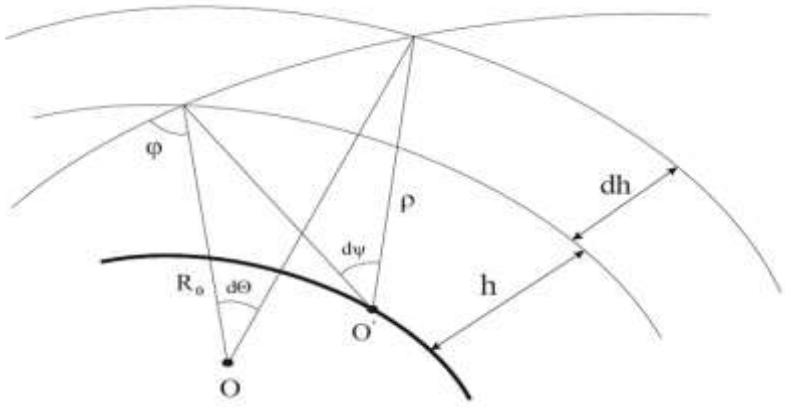


Рис. 2. Распространение радиоволн в слоистой атмосфере

При этом траектория распространения радиоволн описывается отрезком окружности с радиусом кривизны [8]

$$\rho = \frac{n}{(-\mathrm{grad}_h n)\sin\varphi} \approx \frac{1}{(-\mathrm{grad}_h n)}, \tag{4}$$

где $\mathrm{grad}_h n$ – вертикальный градиент коэффициента преломления среды;
φ – угол, образующийся между траекторией луча и поверхностью равных значений коэффициента преломления;
ρ – радиус кривизны траектории радиолуча, искривляемого из-за рефракции (изменения коэффициента преломления n с высотой).

Введение ρ позволяет свести задачу распространения радиоволн в линейно-неоднородной среде вблизи поверхности Земли радиусом $R_З = 6370$ км к задаче о прямолинейном распространении, но с эффективным радиусом $R_Э = kR_З$, при этом $1/R_З - 1/p = 1/kR_З$. Отсюда

$$k = (1 + R_З \mathrm{grad}_h n)^{-1}, \tag{5}$$

где k – коэффициент, определяющий эффективный радиус Земли для упрощенных расчетов распространения радиоволн с учетом рефракции.

В зависимости от величины вертикального градиента коэффициента преломления среды $\mathrm{grad}_h n$ выделяют следующие виды рефракции [8], представленные на рис. 3.

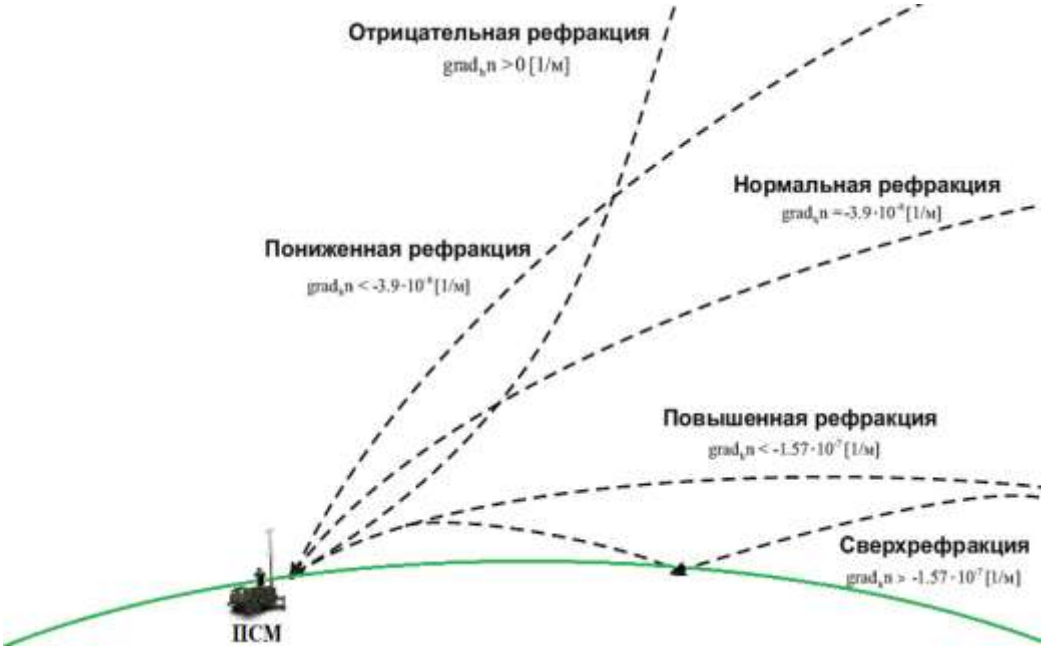


Рис. 3. Виды рефракции радиоволн и траектория распространения

Исследования, проведенные в [8] показывают, что особенно интересны случаи повышенной рефракции и сверхрефракции, так как они приводят к увеличению дальности обнаружения объектов в ВКП.

Необходимо отметить, что существующие методы определения координат основаны на предположении прямолинейности распространения радиоволн [9, 10]. Однако реальный путь, проходимый лучом с учетом искривления, всегда больше, чем при условии прямолинейного распространения. Разница между расстояниями, пройденными электромагнитной волной в условиях реальной среды и по модели прямолинейного распространения, вызывает появление рефракционной ошибки, которая независимо от типа рефракции всегда имеет положительное значение. В частности, при оценке расстояния до наблюдаемого объекта рефракционная ошибка определяется как функция постоянной составляющей коэффициента преломления n на протяжении всей траектории распространения радиоволны от источника до приемника сигнала:

$$\Delta r = R(n-1), \tag{6}$$

где R – геометрическая дальность до объекта;

n – коэффициент преломления атмосферы на трассе распространения радиоволны.

Величина рефракционной ошибки Δr может достигать до 200 м по дальности при одностороннем распространении и одной минуты по угловым координатам на дальностях до 200 км [6].

Таким образом, необходимо учитывать влияние внешней среды при эксплуатации ПИСМ ВКП. В зависимости от типа объекта наблюдения можно применять либо аналитическую модель распространения радиоволн (воздушные объекты), основанную на регулярной зависимости индекса преломления от высоты, либо статистическую модель (наземные и надводные объекты), основанную на экспериментальных данных [5, 8]. Кроме того, в реальных

условиях траектория распространения радиоволн подвергается искривлению из-за эффектов рефракции. В результате этого в точке приема происходят изменения фазовых соотношений между прямым и отраженным от земной поверхности лучами. Взаимодействие рефракции и интерференции радиоволн приводит к тому, что поле в точке приема приобретает более выраженный интерференционный характер, который зависит как от характеристик земной поверхности, так и от коэффициента преломления атмосферы [11].

УЧЕТ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПАССИВНЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Оценим, насколько информационные возможности ПИСМ в реальных условиях могут отличаться от идеализированных сценариев.

Одним из ключевых факторов, определяющих информационные возможности ПИСМ, является рабочая зона – пространство, в пределах которого достигаются установленные цели. Важным аспектом оценки рабочей зоны является дальность прямой видимости, которая представляет собой расстояние от источника излучения до точки, где возможно получение сигналов без экранирования поверхностью Земли. Дальность прямой видимости определяется техническими характеристиками приемного устройства ПИСМ, а также условиями распространения радиоволн в окружающей среде.

С учетом искривления траектории луча вследствие рефракции и при условии, что высота подъема передающей и приемной антенн значительно меньше радиуса Земли, выражение для расчета дальности прямой видимости $D_{\text{ПР ВИД}}$ имеет вид [12]

$$D_{\text{пр вид}} = \sqrt{\frac{2R_0}{1 + R_0 \frac{dn}{dh}}}\left(\sqrt{h_{\text{из}}} + \sqrt{h_{\text{пимс}}}\right), \qquad (7)$$

где R_0 – радиус Земли, $R_0 = 6370$ км;

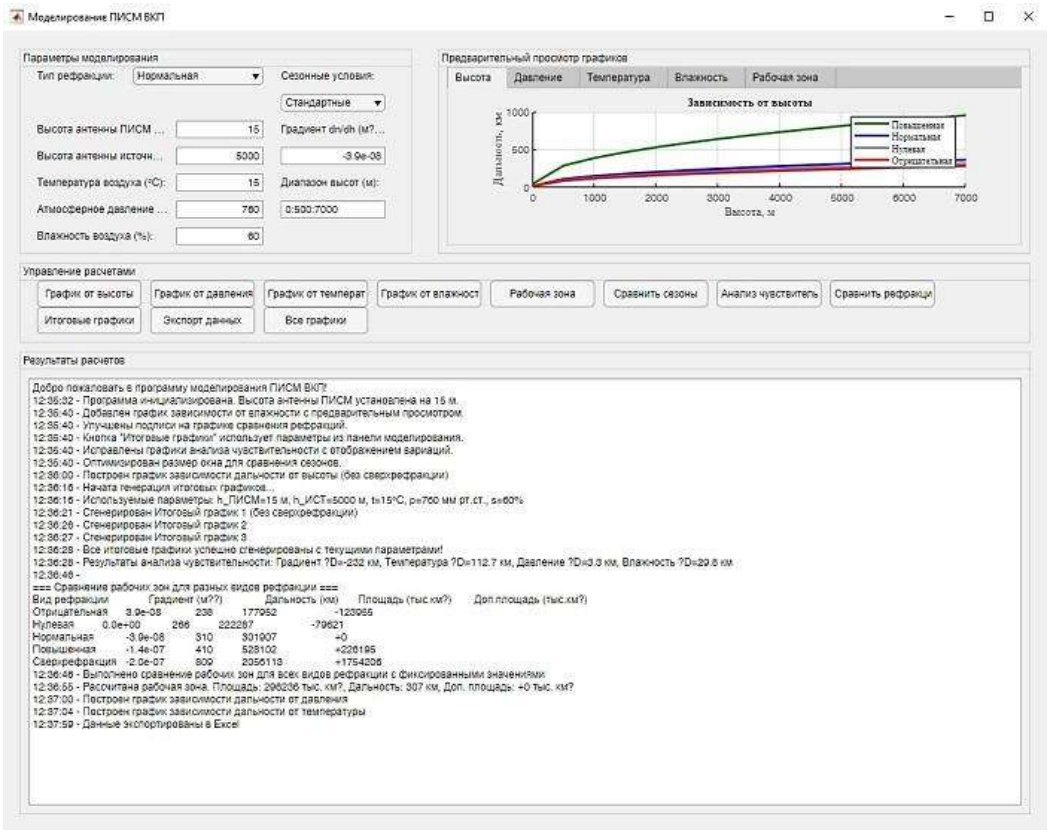
dn/dh – вертикальный градиент коэффициента преломления (изменение коэффициента преломления n с высотой h);

$h_{\text{ИЗ}}$ – высота источника излучения относительно общего уровня земли, м;

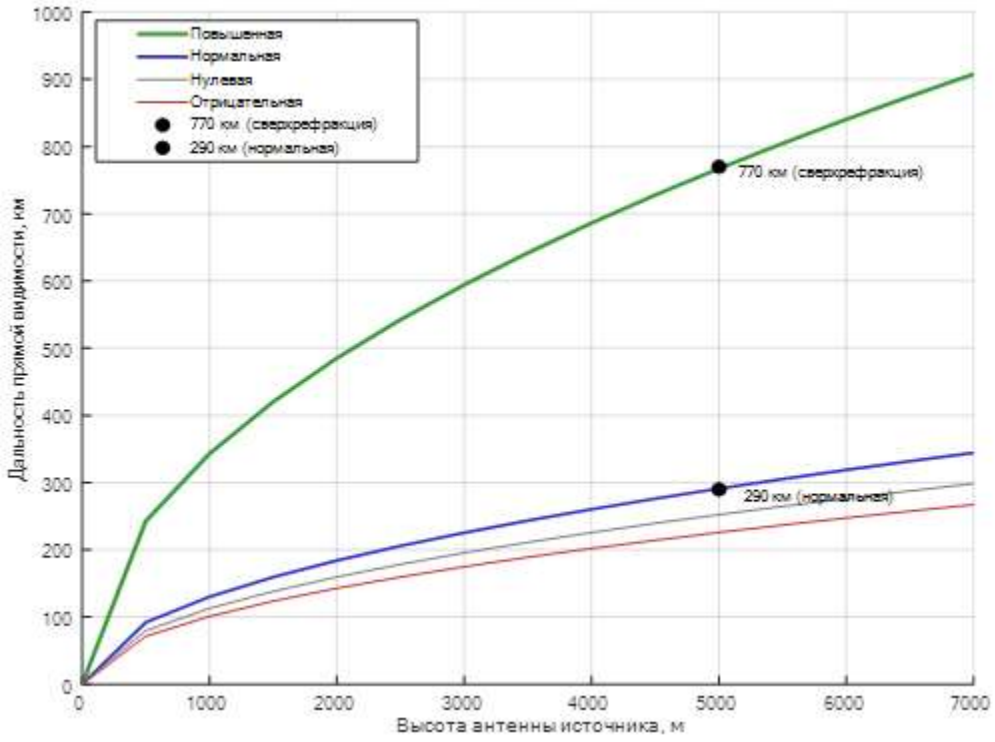
$h_{\text{ПИМС}}$ – высота подъема антенны ПИСМ, м.

Для комплексного анализа влияния атмосферных условий на информационные возможности ПИСМ ВКП разработана специализированная программа математического моделирования в среде MATLAB (рис. 4,*а*). Программа позволяет проводить многовариантные расчеты и визуализировать ключевые зависимости в динамическом режиме.

На рис. 4,*б* представлены результаты расчета дальности прямой видимости $D_{\text{ПР ВИД}}$ в зависимости от высоты подъема антенны источника излучения при нулевой высоте антенны приемника для различных значений градиента коэффициента преломления [13]. Анализ рис. 4,*б* показывает, что при высоте источника излучения $h_{\text{ИЗ}}$ 5000 м дальность прямой видимости $D_{\text{ПР ВИД}}$ увеличивается от 290 км при нормальной рефракции до 770 км при сверхрефракции. В данном случае особенно важным для ПИСМ является случай повышенной рефракции, поскольку наблюдается значительное увеличение дальности обнаружения. В ситуациях с отрицательной рефракцией или с ее отсутствием прирост дальности прямой видимости $D_{\text{ПР ВИД}}$ оказывается незначительным. В связи с этим дальнейшие расчеты будем выполнять для двух случаев атмосферной рефракции: повышенной ($\text{grad}_h n = -1{,}4 \cdot 10^{-7}$ [1/м]) и нормальной ($\text{grad}_h n = -3{,}9 \cdot 10^{-8}$ [1/м]).



а)



б)

Рис. 4. Графический интерфейс программы в среде MATLAB (а) и сравнительный анализ влияния различных видов рефракции на дальность прямой видимости (б)

Проанализируем влияние метеопараметров на дальность прямой видимости, используя аналитическую модель атмосферы. Для примера в табл. 1 представлены результаты расчета дальности прямой видимости $D_{\text{ПР ВИД}}$ в зависимости от атмосферного давления p. Данные в табл. 1 являются результатом комплексного применения формул (2) и (7). Формула (2) используется для определения коэффициента преломления n через метеопараметры (температуру, давление, влажность). Он, в свою очередь, влияет на градиент dn/dh в формуле (7).

Таблица 1

Влияние атмосферного давления на дальность прямой видимости

Атмосферное давление p, мм рт. ст.	Градиент коэффициента преломления dn/dh, м$^{-1}$	Высота антенны источника $h_{\text{ИЗ}}$, м	Дальность прямой видимости $D_{\text{ПР.ВИД}}$, км
730	$-3{,}9\times10^{-8}$	5000	~310
700	$-1{,}4\times10^{-7}$	5000	~340

Как показывают результаты расчетов, представленные в табл. 1, снижение атмосферного давления с 730 до 700 мм рт. ст. приводит к увеличению модуля отрицательного градиента коэффициента преломления с $-3{,}9\times10^{-8}$ до $-1{,}4\times10^{-7}$ м$^{-1}$. Это изменение градиента напрямую влияет на дальность прямой видимости $D_{\text{ПР.ВИД}}$, которая возрастает с 310 км при нормальных условиях до 340 км в условиях повышенной рефракции. Следовательно, уменьшение атмосферного давления на 30 мм рт. ст. обеспечивает прирост дальности на 30 км, что демонстрирует существенное влияние на рабочие характеристики ПИСМ. Полученные данные подтверждают необходимость учета вариаций атмосферного давления при точном прогнозировании информационных возможностей ПИСМ.

Для визуального анализа полученных результатов выполнено построение графических зависимостей, отражающих влияние ключевых метеопараметров на дальность ПИСМ: градиента коэффициента преломления, температуры воздуха, атмосферного давления и влажности. Моделирование проведено при следующих базовых параметрах:

– высота антенны ПИСМ 15 м;
– высота источника излучения 5000 м;
– температура воздуха 15°С;
– атмосферное давление 700 мм рт. ст.;
– влажность 60%.

При анализе чувствительности каждого параметра остальные метеопараметры сохранялись постоянными.

Результаты моделирования представлены на рис. 5. На рисунке видно, что наибольшее влияние на дальность прямой видимости $D_{\text{ПР ВИД}}$ оказывают градиент коэффициента преломления (диапазон изменения до 220 км), затем температура воздуха (до 106,9 км), влажность (до 28,3 км) и атмосферное давление (до 3,1 км). При этом влияние атмосферного давления является практически незначительным по сравнению с другими факторами. Такое соотношение влияния метеопараметров необходимо учитывать при разработке и оптимизации систем мониторинга. Полученные данные подтверждают необходимость приоритетного мониторинга градиента коэффициента преломления при прогнозировании рабочих характеристик ПИСМ. Это обусловлено тем, что данный параметр напрямую определяет кривизну траектории распространения радиоволн и, как следствие, максимальную дальность обнаружения объектов.

Наиболее наглядным пространственным показателем, который позволяет оценить влияние атмосферной рефракции на информационные возможности ПИСМ, является размер рабочей зоны. Если не брать в расчет тактико-технические характеристики ПИСМ, то размер рабочей зоны, в первую очередь, определяется дальностью прямой видимости [9, 12, 14], как показано на рис. 6.

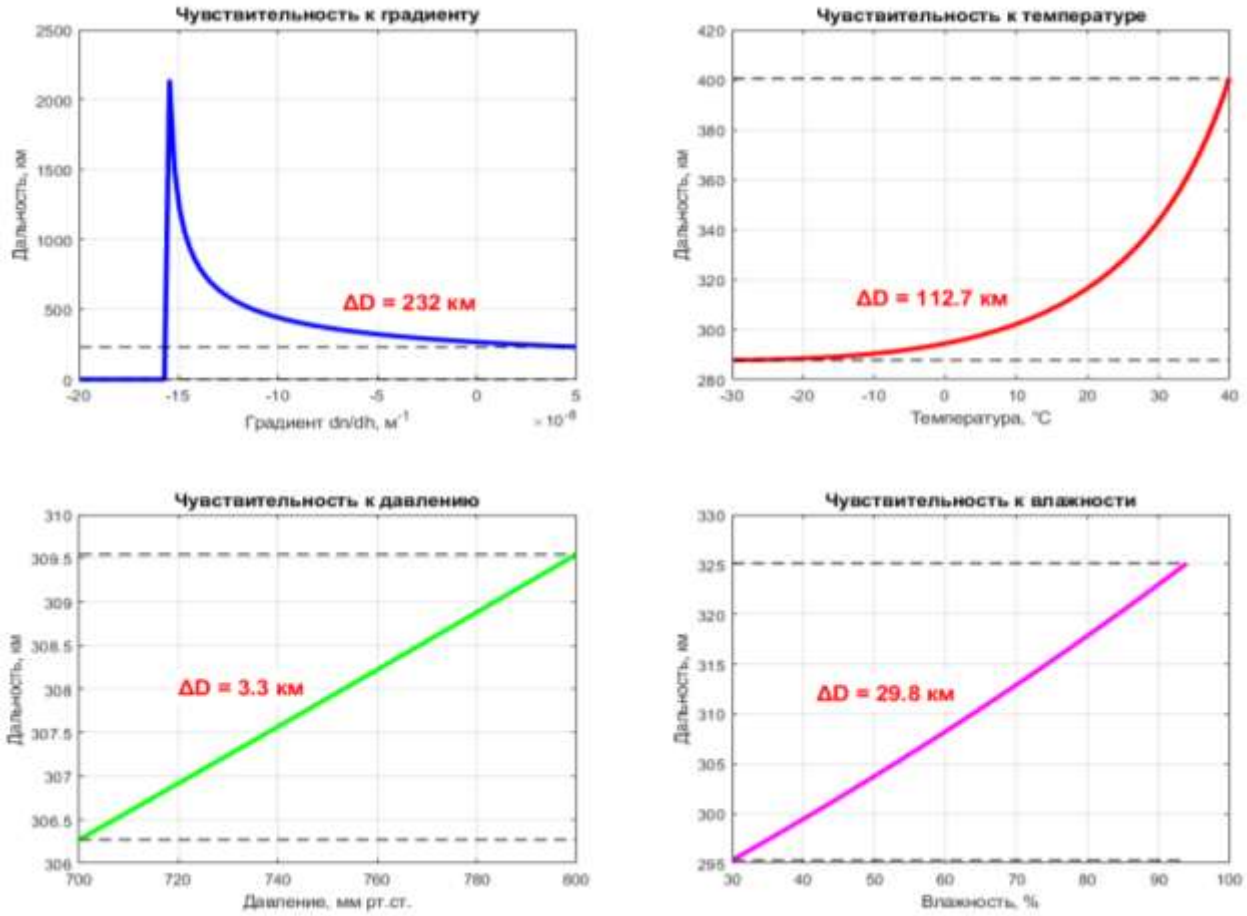


Рис. 5. Комплексный анализ чувствительности дальности прямой видимости к метеопараметрам

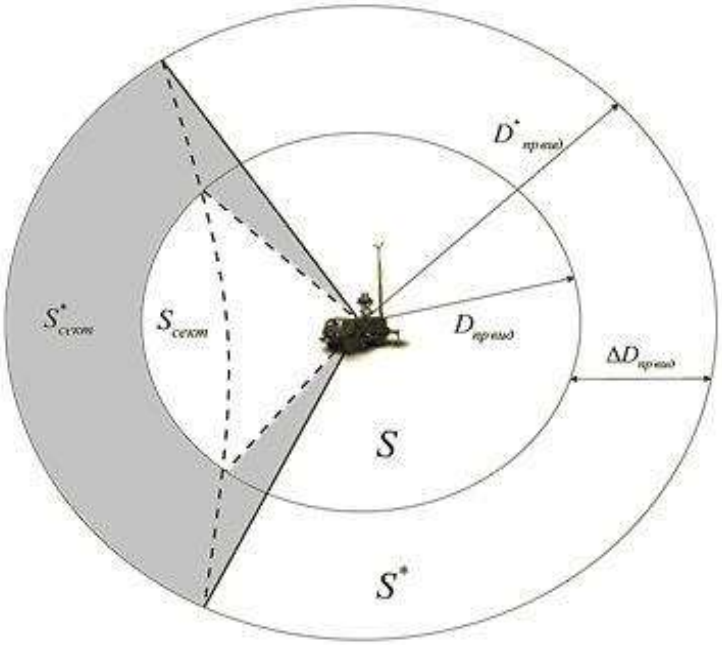


Рис. 6. Зона действия ПИСМ в зависимости от дальности прямой видимости

Площадь рабочей зоны ПИСМ определяется при принятии допущения об идеально гладкой и плоской поверхности в точке их размещения.

При проведении кругового поиска сигнала зона поиска определяется по формуле [15]

$$S = \pi D_{\text{пр вид}}^2. \quad (8)$$

Рассмотрим зону поиска с учетом рефракции:

$$S^* = \pi D_{\text{пр вид}}^{*2} = \pi(D_{\text{пр вид}} + \Delta D_{\text{пр вид}})^2.$$

В результате получим дополнительную зону, определенную за счет рефракции радиоволн:

$$S^{**} = S^* - S = \pi \Delta D_{\text{пр вид}} \left(2D_{\text{пр вид}} + \Delta D_{\text{пр вид}}\right)^2. \quad (9)$$

Для количественной оценки влияния рефракции на рабочую зону ПИСМ были проведены расчеты по формулам (8) и (9). Расчеты выполнены для следующих начальных условий:

– высота антенны источника 5000 м;

– высота антенны ПИСМ 15 м;

– радиус Земли принят равным 6370 км.

Значения градиента коэффициента преломления соответствуют стандартным атмосферным условиям, приведенным в табл. 1. В табл. 2 представлены результаты расчетов площади рабочей зоны и дополнительной площади, полученной за счет рефракции, для двух типов рефракции: нормальной и повышенной. Расчеты показывают, что при повышенной рефракции площадь рабочей зоны увеличивается на 226 тыс. км², что демонстрирует значительное влияние атмосферных условий на информационные возможности ПИСМ.

Таблица 2

Влияние рефракции на рабочую зону ПИСМ

Тип рефракции	Градиент dn/dh, $м^{-1}$	Дальность D, км	Площадь рабочей зоны S, тыс. км²	Дополнительная площадь $S_{доп}$, тыс. км²
Нормальная	$-3{,}9 \times 10^{-8}$	310	~302	0
Повышенная	$-1{,}4 \times 10^{-7}$	410	~528	~226

Анализ данных табл. 2 позволяет утверждать, что рефракционные явления в атмосфере способствуют значительному увеличению рабочей зоны ПИСМ. В условиях повышенной рефракции наблюдается увеличение дальности прямой видимости на 100 км и увеличение площади рабочей зоны на 226 тыс. км² по сравнению с нормальными условиями. Это подчеркивает необходимость учета рефракционных эффектов при прогнозировании информационных возможностей ПИСМ, поскольку изменение атмосферных условий может приводить к значительному расширению зоны мониторинга.

Для более наглядного представления полученных результатов и визуального сравнения эффективности работы ПИСМ при различных атмосферных условиях целесообразно использовать графическое представление рабочих зон. Результаты расчетов выполнены с помощью формул (8), (9) и представлены на рис. 7.

Рассмотрев рис. 7, можно сделать следующие ключевые выводы, демонстрирующие сильную зависимость рабочей зоны от типа рефракции. При переходе от отрицательной рефракции (238 км, 178 тыс. км²) к повышенной рефракции (410 км, 528 тыс. км²) наблюдается уве-

личение дальности прямой видимости в 1,7 раза, а площади рабочей зоны – в 3,0 раза. Особенно значительное увеличение отмечается между нормальной (310 км, 302 тыс. км²) и повышенной рефракцией, где площадь рабочей зоны увеличивается на 226 тыс. км² (в 1,7 раза). Полученные данные подтверждают, что учет рефракционных эффектов позволяет существенно увеличить информационные возможности ПИСМ без изменения их технических характеристик.

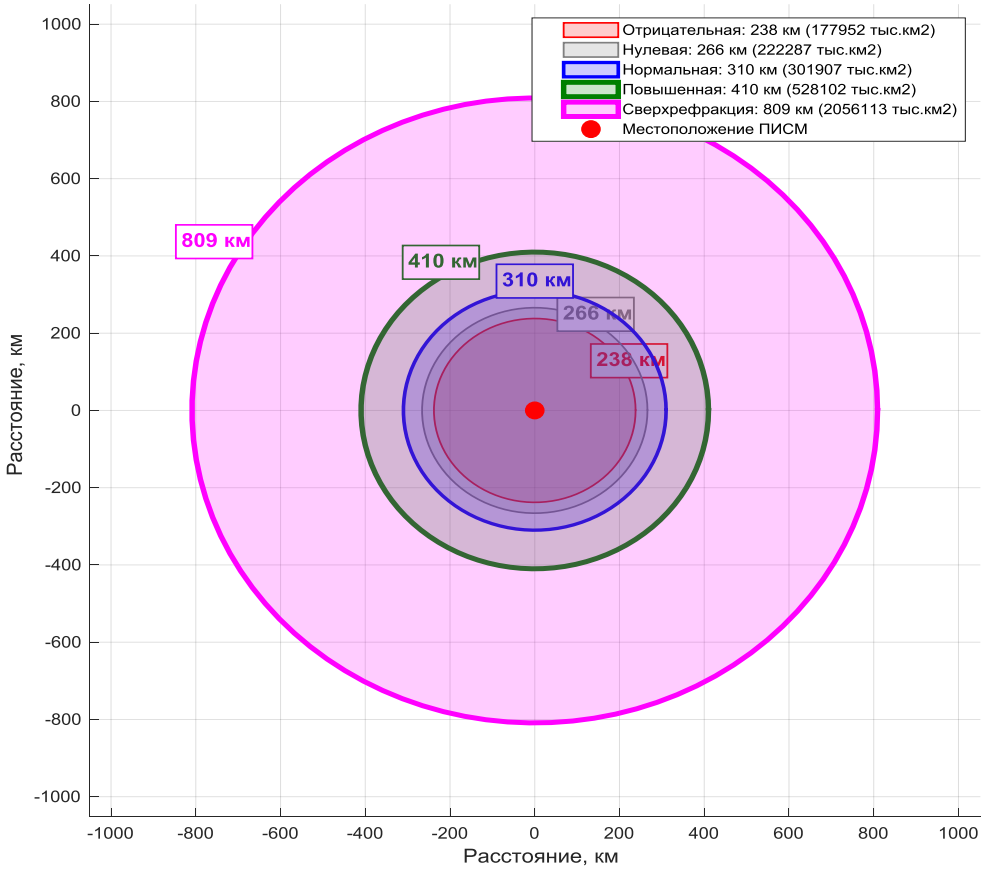


Рис. 7. Сравнение рабочих зон ПИСМ при различных видах рефракции

Для оценки влияния сезонных изменений атмосферных условий на информационные возможности ПИСМ проведено моделирование для типичных метеопараметров, характерных для различных времен года. На рис. 8 представлены результаты расчета дальности прямой видимости в зависимости от высоты антенны источника для условий зимы, весны, лета и осени. Моделирование выполнено при высоте антенны ПИСМ 15 м и стандартных сезонных параметрах: зимой (температура -15°C, давление 770 мм рт. ст., влажность 80%), весной (10°C, 760 мм рт. ст., 75%), летом (25°C, 755 мм рт. ст., 65%) и осенью (5°C, 765 мм рт. ст., 85%).

Рассмотрение рис. 8 показывает, что сезонные изменения атмосферных параметров оказывают существенное влияние на дальность прямой видимости. Наибольшая дальность наблюдается в летних условиях, что обусловлено более высокой температурой и пониженным давлением, способствующими возникновению условий повышенной рефракции. Наименьшая дальность характерна для зимних условий. Разница в дальности между летним и зимним сезонами достигает 10–15% в зависимости от высоты антенны источника. Полученные данные подтверждают необходимость учета сезонных изменений атмосферных параметров при прогнозировании информационных возможностей ПИСМ.

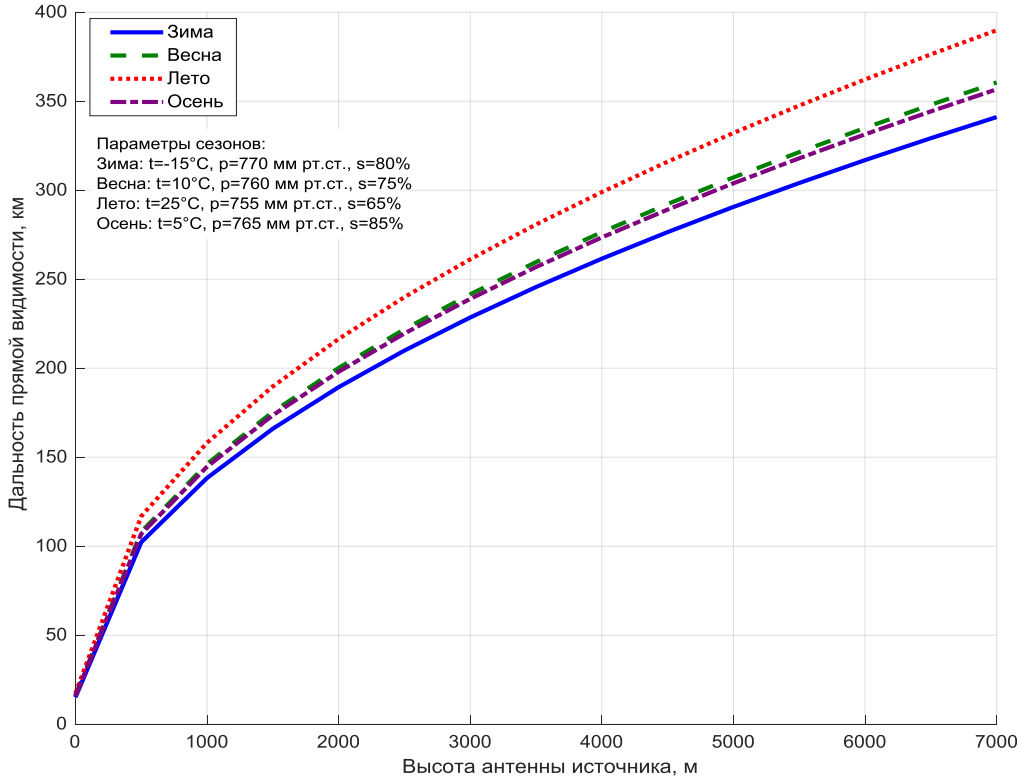


Рис. 8. Сравнение дальности прямой видимости для различных сезонных условий

Полученные результаты имеют важное практическое значение для оперативного планирования работы ПИСМ, поскольку учет выявленных закономерностей позволяет оптимизировать размещение ПИСМ с учетом сезонных изменений атмосферных условий, повысить достоверность оценки информационных возможностей системы в различных метеорологических условиях, эффективно планировать мероприятия по мониторингу ВКП с учетом прогнозируемых рефракционных условий, а также своевременно корректировать рабочие зоны обнаружения при изменении атмосферных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ факторов, влияющих на информационные возможности ПИСМ ВКП, показал, что наиболее значительными являются случаи повышенной рефракции и сверхрефракции атмосферы. Для учета воздействия внешней среды предлагается использовать либо аналитическую модель распространения радиоволн, основанную на регулярной зависимости индекса преломления от высоты, либо статистическую модель, разработанную на основе экспериментальных данных. Сравнение и совместное использование моделей обеспечивает комплексный подход, который позволяет проводить взаимную верификацию результатов, оценивать диапазон возможных изменений рабочих характеристик и создавать основу для адаптивных алгоритмов работы системы. Это повышает достоверность прогнозирования рабочей зоны и эффективность планирования применения средств мониторинга без модернизации их аппаратной части.

Проведенное исследование позволило установить количественные зависимости между параметрами атмосферы и характеристиками ПИСМ ВКП. Разработан программный комплекс в среде MATLAB, который обеспечил проведение многовариантного анализа с высокой степенью достоверности.

В ходе исследования установлены точные количественные зависимости влияния рефракционных явлений на рабочие характеристики ПИСМ, которые показывают, что изменение градиента коэффициента преломления от $-3{,}9\times10^{-8}$ до $-1{,}4\times10^{-7}$ $м^{-1}$ увеличивает дальность прямой видимости на 32% (со 310 до 410 км), а площадь рабочей зоны – на 75% (с 302 до 528 тыс. км²). Определена четкая иерархия влияния метеопараметров на дальность обнаружения: градиент коэффициента преломления (вариация до 220 км) > температура воздуха (до 106,9 км) > влажность (до 28,3 км) > атмосферное давление (до 3,1 км), что позволяет оптимизировать систему мониторинга атмосферных параметров. Выявлены сезонные закономерности изменения рабочих характеристик ПИСМ, где летние условия обеспечивают максимальную дальность обнаружения, превышающую зимние показатели на 10–15%, что обусловлено комплексным влиянием температуры, давления и влажности. Предложенный расчет позволяет существенно повысить эффективность систем мониторинга ВКП без изменения их технических характеристик.

Полученные результаты обладают значительной практической ценностью для оперативного планирования работы ПИСМ и могут быть использованы при проектировании перспективных систем мониторинга. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку интегрированных моделей, учитывающих совместное влияние рефракции и интерференции радиоволн, а также на создание систем прогнозирования рабочих характеристик ПИСМ с использованием технологий искусственного интеллекта и методов анализа больших данных.

Список использованных источников

1. *Казаков Л. Я., Ломакин А. Н.* Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М. : Наука, 1976. – 165 с.

2. *Фейнберг Е. Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. – 2-е изд. – М. : Наука. Физматлит, 1999. – 496 с.

3. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 180 с.

4. *Шиллеров В. А.* Распространение ультракоротких волн : пер. с англ. / под ред. В. А. Шиллерова. – М. : Сов. Радио, 1985. – 710 с.

5. *Лобкова Л. М.* Распространение радиоволн над морской поверхностью. – М. : Радио и связь, 1991. – 325 с.

6. *Серков В. П.* Распространение радиоволн и антенные устройства. – Л. : Изд-во ВАС, 1981. – 468 с.

7. *Финкельштейн М. И.* Основы радиолокации. – М. : Радио и связь, 1983. – 536 с.

8. *Закиров В. Х., Закиров С. В., Цыбульник А. Н.* Оценка влияния внешней среды на точность методов измерения координат источников радиоизлучения // Материалы XI Всероссийской НПК «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения». – Ярославль, 2010. – Ч. II. – С. 418–426.

9. *Сколник М. И.* Справочник по радиолокации. – В 2 кн. – М. : Техносфера, 2014. – Кн. 2. – 680 с.

10. *Сытенький В. Д., Маркович И. И., Завтур Е. Е.* Определение координат источников излучения в пассивных РЛС амплитудным методом // Известия ЮФУ. Технические науки, 2021. – Вып. 1(218). – С. 72–81.

11. *Коваль А. А.* Пространственно-временные характеристики пассивных помех, обусловленные сверхрефракцией // Научно-технический сборник. – Харьков: Изд-во ХВУ. – 1996. – Вып.11, ч. 3. – С. 58–64.

12. *Закиров В. Х., Закиров С. В., Цыбульник А. Н.* Радиотехническая разведка. Оценка разведывательно-информационных показателей средств РТР с учетом влияния атмосферы : моногр. – Ярославль : Изд-во ЯрГПУ им. К.Д. Ушинского, 2011. – 118 с.

13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021611013. Программа для оценки энергетических характеристик разнесенной радиолокационной системы с кооперируемым (некооперируемым) источником подсвета / Р. С. Володин. – заявл. 11.01.2021; опубл. 20.01.2021.

14. *Володин Р. С., Комиссаров А. В., Тараканов М. Н.* Оценка потенциальной реализуемой зоны обнаружения баллистических объектов по сигналам наземных некооперируемых источников излучения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 37–44.

Д. А. Мосин,
доктор военных наук, доцент;
А. Л. Федер,
доктор военных наук, доцент;
С. В. Чащин,
кандидат технических наук

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ДУЭЛЬНОЙ СИТУАЦИИ «ОБЪЕКТ – НАРУШИТЕЛЬ»

Работа посвящена моделированию и оценке киберустойчивости автоматизированных систем в дуэльной ситуации «объект – нарушитель». Вводится количественная мера устойчивости, основанная на двух показателях: состоянии архитектуры *Css* и функциональной результативности K_{Zsr}. Для их расчета разработан формальный аппарат, объединяющий теоретико-множественные модели системы *Mst*, угроз *Mth*, контрмер *Mcm* и восстановления *Msv*, а также метод оценки динамики на основе цепей Маркова. Имитационное моделирование подтвердило, что синергия контрмер и восстановления повышает *Css* и K_{Zsr} до 32%. Максимальный эффект (рост K_{Zsr} от приблизительно 38% до примерно 82% и уровня устойчивости – до 76%) достигнут при сочетании проактивных контрмер и адаптивных механизмов восстановления. Результаты демонстрируют практическую применимость подхода для перехода к опережающим стратегиям защиты автоматизированных систем.

Ключевые слова: киберустойчивость, автоматизированная система, дуэльная ситуация, показатель состояния системы *Css*, коэффициент выполнения задач K_{Zsr}, теоретико-множественная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления невозможно представить без применения автоматизированных систем (АС), которые пронизывают организации как в вертикальных, так и горизонтальных плоскостях. Несмотря на очевидные преимущества использования таких систем, нельзя упомянуть и о проблемах, присущих им. Одной из объективных проблем стабильной реализации циклов управления технологическими процессами (ЦУ ТП) в автоматизированных системах управления является наличие нарушителя (как внутреннего, так и внешнего). Проблема устойчивого функционирования АС не нова. В научной литературе [1] представлен спектр подходов к ее решению, включая методы резервирования (аппаратного, информационного, временного, алгоритмического), стратегии централизации и децентрализации управления ресурсами и задачами, а также механизмы реконфигурации системной архитектуры.

Однако растущая сложность и целенаправленность современных кибератак, прежде всего в отношении критически важных объектов, делают традиционные пассивные меры защиты недостаточными. Угроза приобретает дуэльный характер, где нарушитель адаптирует свои действия в ответ на защитные меры системы. Это формирует динамическое противостояние, в котором устойчивость АС определяется способностью эффективно противодействовать, восстанавливаться и сохранять функциональность в условиях непрерывного противоборства.

Анализ текущих исследований в области структурно-функциональных изменений АС выявил существенный пробел: в существующих подходах не учитывается комплексное взаимодействие факторов, определяющих устойчивость выполнения ЦУ ТП в условиях динамического противостояния «объект – нарушитель».

Для корректного определения пространства решений, в котором АС гарантированно реализует ЦУ ТП в соответствии с установленными требованиями, необходима предварительная формализация на рассматриваемом интервале времени целевых функций, архитектуры, информационных технологий и компенсационных процедур (восстановление работоспособности и ликвидация выявленных информационных уязвимостей).

ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫХ ТЕРМИНАХ

В качестве объекта исследования выступает АС с типовой (базовой) архитектурой структуры систем управления (рис. 1). Как правило, все сложные АС разбиваются на сектора (подсистемы), что позволяет решить ряд проблем при их создании. Большую монолитную систему понять и модернизировать крайне сложно. Разделение на сектора позволяет разбить одну глобальную задачу на множество небольших, понятных и относительно независимых. Повышается надежность и отказоустойчивость за счет изоляции сбоев и некорректной работы отдельных узлов системы. Усиливается информационная безопасность в результате применения принципа минимальных привилегий: каждому сектору выделяются только необходимые ему права доступа к данным и функциям. Кроме того, деление на сектора может быть обусловлено циркуляцией в АС информации различной степени конфиденциальности.

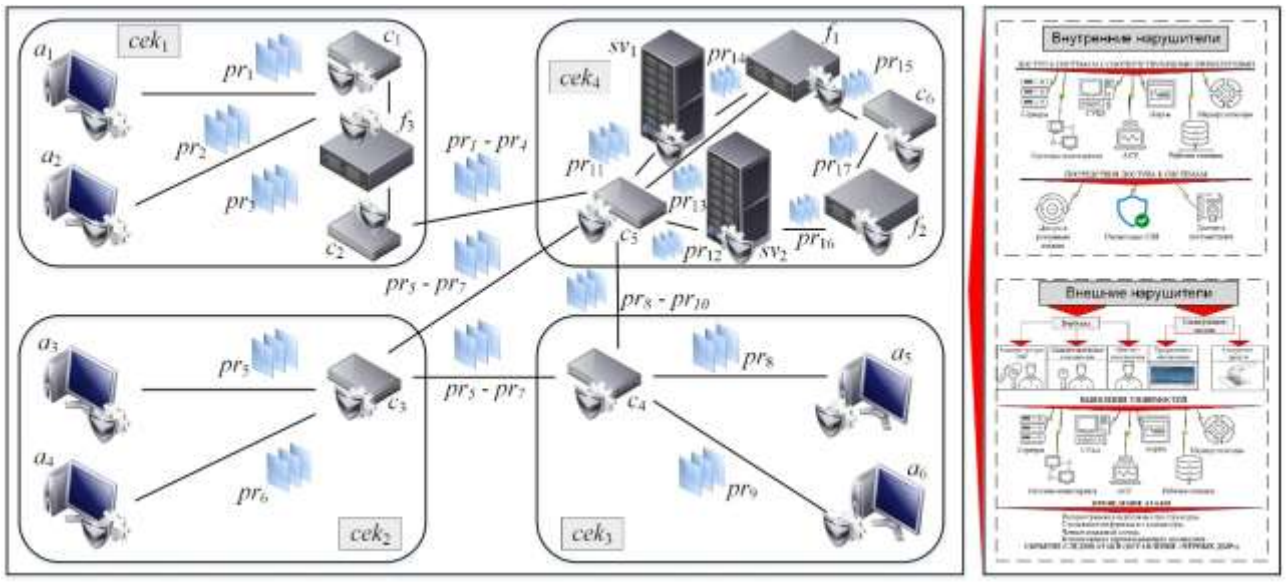


Рис. 1. Базовая архитектура АС управления

При разработке теоретико-множественной модели рассматриваемой АС принят ряд допущений.

Процессы, порождаемые в элементах АС для выполнения цикла управления (сбора, хранения, обработки и передачи), не делятся на системные и пользовательские. Однако в модель введена характеристика критичности процесса, определяющая значимость его влияния на выполнение задачи элементом системы.

Модель нарушителя [3] не затрагивает возможность проведения им сложных комбинированных многоуровневых атак. В связи с чем не рассматривались такие сценарии атак как Cyber Kill Chain и ATT&CK. Целью нарушителя является внесение возмущений в работу элементов АС и обнаруженные процессы. Также не учитывается степень принадлежности нарушителя к АС. Моделирование атаки нарушителя на элементы АС построено на дискретно-событийном подходе. В пределах одного временного интервала моделируется не более одного целенаправленного инцидента (атаки) со стороны нарушителя.

Теоретико-множественная постановка задачи представлена в следующем виде.

Дано:

I. Модель *Mst*, описывающая структуру и функционирование автоматизированной системы

$$Mst = \langle Cek, Arm, Cet, Lsv, Msr, Mirz \rangle .$$

Здесь Cek – множество секторов, характеризующих функциональную структуру АС,

$$Cek = \{cek_1, cek_2, ..., cek_n\}.$$

Состав сектора задается функцией $F : Cek \to Arm \times Cet \times Lvs \times Mirz \times Msr$. Для каждого сектора задаются отношения:

$$F(cek_i) = (Arm_i, Cet_i, Lvs_i, Mirz_k, Msr_l),$$

где $Arm_i \subseteq Arm$, $Cet_i \subseteq Cet$, $Lvs_i \subseteq Lvs$, $mirz_k \in Mirz$, $msr_l \in Msr$; I – бинарная матрица, где $I[i, j] = 1$, j принадлежит подмножеству, связанному с cek_i согласно *F*;

Arm – множество хостов АС,

$$Arm = \{a_1, a_2, ..., a_k; sv_1, sv_2, ..., sv_{ks}\},$$

где k – количество автоматизированных рабочих мест;

ks – количество серверов;

Cet – множество сетевого оборудования, обеспечивающего информационный обмен,

$$Cet = \{c_1, c_2, ..., c_m; ca_1, ca_2, ..., ca_k; cf_1, cf_2, ..., cf_{kf}\},$$

где m – количество роутеров, маршрутизаторов, коммутаторов;

k – количество сетевых карт;

kf – количество межсетевых экранов;

Lsv – множество линии связи между элементами АС задано отношением

$$Lsv \subseteq Arm \times Cet;$$

Msr – модель сервисов, обеспечивающих решение информационно-расчетных задач в АС,

$$Msr = \langle Pr, Kpr, Lpr, Tpr \rangle,$$

где Pr – множество процессов, возникающих при решении информационно-расчетных задач в АС,

$$Pr = \{pr_1, pr_2, ..., pr_t\};$$

Kpr – множество коэффициентов критичности выполняемых процессов,

$$Kpr = \{kpr_1, kpr_2, ...kpr_t\};$$

Lpr – множество маршрутно-адресных связей между процессами задано отношением

$$Lpr \subseteq Pr_{kpr}^{tpr} \times Pr_{kpr}^{tpr};$$

Tpr – множество временных отрезков существования процессов,

$$Tpr = \{tpr_1, tpr_2, ..., tpr_t\};$$

$Mirz$ – модель информационно-расчетных задач,

$$Mirz = \langle Zsr, T^{tf}, Mip \rangle,$$

где Zsr – множество задач, реализующих целевые функции АС,

$$Zsr = \{zsr_1, zsr_2, ..., zsr_{zr}\};$$

T^{tf} – множество временных интервалов, отводимых на выполнение Zsr,

$$T^{tf} = \{t_{zsr_1}^1, t_{zsr_2}^2, ..., t_{zsr_{zr}}^{zr}\};$$

Mip – матрица информационных трактов выполнения Zsr,

$$Mip \subseteq Zsr \times T^{tf}.$$

II. Модель угроз программно-математического воздействия нарушителя Mth на АС:

$$Mth = \langle Aexl, Cexl, Msk \rangle.$$

Здесь *Aexl* – множество уязвимостей хостов,

$$Aexl = \langle Prxl, Armex \rangle,$$

где *Prxl* – множество уязвимостей процессов, функционирующих на хостах,

$$Prxl = \{ prxl_1, prxl_2, ..., prxl_{ext} \};$$

Armex – множество уязвимостей программно-аппаратных элементов хостов,

$$Armex = \{ aex_1, aex_2, ..., aex_{exk}; svex_1, svex_2, ..., svex_{exks} \};$$

Cexl – множество уязвимостей сетевого оборудования,

$$Cexl = \{ cex_1, cex_2, cex_{exk}; caex_1, caex_2, ..., caex_{exk}; cfex_1, cfex_2, ..., cfex_{exkf} \};$$

Msk – модель квалификации нарушителя,

$$Msk = \langle Mim, Pus, Pos \rangle,$$

где *Mim* – совокупность навыков эксплуатации уязвимостей нарушителем,

$$Mim = \{ Sarm, Scet, Spr \}.$$

Здесь *Sarm* – множество навыков эксплуатации уязвимостей *Arm*,

$$Sarm = \{ sa_1, sa_2, ..., sa_{sk}; ssv_1, ssv_2, ..., ssv_{ss} \};$$

Scet – множество навыков эксплуатации уязвимостей *Cet*,

$$Scet = \{ sc_1, sc_2, ..., sc_{sm}; sca_1, sca_2, ...sca_{sk}; scf_1, scf_2, ..., scf_{sf} \};$$

Spr – множество навыков эксплуатации уязвимостей *Pr*,

$$Spr = \{ spr_1, spr_2, ..., spr_{st} \});$$

Pus – совокупность вероятностных характеристик осуществления несанкционированного доступа к элементам АС,

$$Pus = \{ Pusa, Pusc, Pusp \}.$$

Здесь *Pusa* – вероятности несанкционированного доступа к элементам *Arm*,

$$Pusa = \{ua_1, ua_2, \dots, ua_{uk}; usv_1, usv_2, \dots, usv_{us}\};$$

Pusc – вероятности несанкционированного доступа к элементам *Cet*,

$$Pusa = \{ ua_1, uc_2, ..., ua_{uk}; usv_1, usv_2, ..., usv_{us} \};$$

Pusp – вероятности несанкционированного доступа к *Pr*,

$$Pusa = \{ ua_1, uc_2, ..., ua_{uk}; usv_1, usv_2, ..., usv_{us} \};$$

Pos – совокупность вероятностных характеристик преодоления системы защиты АС,

$$Pos = \{ Posa, Posc, Posp \}.$$

Здесь *Posa* – вероятности преодоления системы защиты *Arm*,

$$Posa = \{ oa_1, oa_2, ..., oa_{ok}; osv_1, osv_2, ..., osv_{os} \};$$

Posc – вероятности преодоления системы защиты *Cet*,

$$Posc = \{ oc_1, oc_2, ...oc_{om}; oca_1, oca_2, ..., oca_{ok}; ocf_1, ocf_2, ...ocf_{of} \};$$

Posp – вероятности преодоления системы защиты *Pr*,

$$Posp = \{ opr_1, opr_2, ..., opr_{ot} \}.$$

Для описания динамики дуэльного противостояния модель *Mth* реализуется как трехуровневая вероятностная конструкция.

1. Определяется пространство целей *Uzv* ($Uzv = Prxl \cup Armex \cup Cexl$) и *Mim*. Отношение «нарушитель – уязвимость» задается бинарной матрицей компетенций $K[m,t]$=1, где единица означает владение навыком *mim* для атаки цели *uzv_t*.

2. Вероятностная модель успеха атаки. Функция *Success*, вычисляющая вероятность успешного воздействия на цель $uzv_t \in Uzv$ нарушителем $mim \in Mim$ в момент времени τ при текущем состоянии системы *St*(τ) имеет вид

$$Success(uzv_t, mim, St(\tau)) = P_access * P_overcome.$$

Здесь P_access – вероятность достижения цели,

$$P_access = Pus\left(type\left(uzv_t\right)\right) * G\left(uzv_t,\ St\left(\tau\right)\right),$$

где *Pus* – базовая характеристика, а $G(\ldots) \in [0,\ 1]$ – функтор доступности, рассчитываемый на основе сетевой связности *Lsv* и работоспособности элементов *Css*;

$P_overcome$ – вероятность преодоления защиты,

$$P_overcome = Pos\left(mim, type\left(uzv_t\right)\right) * \left(1 - Eff\left(uzv_t, \tau\right)\right),$$

где *Pos* – базовая характеристика, а $Eff(\ldots) \in [0,1]$ – функтор эффективности контрмер, показывающий степень снижения уязвимости благодаря примененным мерам из *Mcm*.

3. Стратегия адаптивного нарушителя формализуется как функция выбора цели Ψ на каждом шаге дуэльной ситуации *k*. В работе рассматривается стратегия, максимизирующая ожидаемый ущерб:

$$uzv_vib(k) = \Psi\left(Uzv, St\right) = argmax\{t \in Uzv\}\ [Success\left(uzv_t,\ \ldots\right) * Impact\left(uzv_t, St\right)],$$

где *Impact*(…) – оценка ущерба от компрометации цели.

Алгоритм хода нарушителя. На каждом дискретном шаге модели *k*:

а) на основе *St*(*k*) и стратегии Ψ выбирается цель *uzv_vib*(*k*);

б) по формуле $uzv_vib(k) = \Psi\left(Uzv, St\right)$ вычисляется вероятность успеха *p* = *Success*(…);

в) генерируется событие атаки: если $rand(0,1) \le p$, то состояние элемента, ассоциированного с целью, в *St*(*k*+1) переводится в одно из состояний работоспособности.

III. Модель применения контрмер *Mcm* по закрытию уязвимостей в АС:

$$Mcm = \left\langle SV, T_{sv}^{dr}, P_{sv}^{dr}, Apl \right\rangle.$$

Здесь *SV* – множество навыков по работе со средствами защиты информации,

$$SV = \left\langle SVarm, SVcet, SVpr \right\rangle,$$

где *SVarm* – множество навыков по работе со средствами защиты *Arm*,

$$SVarm = \left\{va_1, va_2, ..., va_{vk}; vsv_1, vsv_2, ..., vsv_{vs}\right\};$$

SVcet – множество навыков по работе со средствами защиты *Cet*,

$$SVcet = \left\{vc_1, vc_2, ..., vc_{sm}; vca_1, vca_2, ..., vca_{sk}; vcf_1, vcf_2, ...vcf_{sf}\right\};$$

SVpr – множество навыков по работе со средствами защиты *Pr*,

$$SVpr = \left\{vpr_1, vpr_2, ..., vpr_{vt}\right\};$$

T_{sv}^{dr} – совокупность директивных временных интервалов закрытия уязвимости,

$$T_{sv}^{dr} = \left\{T_{sva}^{dr}, T_{svc}^{dr}, T_{svp}^{dr}\right\},$$

где T_{sva}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для устранения выявленных уязвимостей в *Arm*;

T_{svc}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для устранения выявленных уязвимостей в *Cet*;

T_{svp}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для устранения выявленных уязвимостей в *Pr*;

P_{sv}^{dr} – совокупность вероятностных характеристик того, что за указанное директивное время будут закрыты уязвимости,

$$P_{sv}^{dr} = \left\{ P_{sva}^{dr}, P_{svc}^{dr}, P_{svp}^{dr} \right\},$$

где P_{sva}^{dr} – вероятности закрытия выявленных уязвимостей в *Arm* за T_{sva}^{dr};

P_{svc}^{dr} – вероятности закрытия выявленных уязвимостей в *Cet* за T_{svc}^{dr};

P_{svp}^{dr} – вероятности закрытия выявленных уязвимостей в *Pr* за T_{svp}^{dr}.

Apl – отношение $Apl : Uzv \times SV \times T_{sv}^{dr} \to P_{sv}^{dr}$, на основе которого строится тензор *E*, где элемент $E[j,k,l] = Apl(uzv, sv, t) = p \,|\, p \in P_{sv}^{dr}$ хранит вероятность *p* из отображения *Apl* (где индекс *j* – идентификатор уязвимости $Uzv = Prxl \cup Armex \cup Cexl$, индекс *k* – идентификатор *SV*, индекс *l* – идентификатор T_{sv}^{dr}).

IV. Модель восстановления *Msv* работоспособности элементов АС:

$$Msv = \left\langle SR, T_{rs}^{dr}, P_{rs}^{dr}, Rev \right\rangle.$$

Здесь *SR* – множество навыков по восстановлению элементов АС,

$$SR = \left\langle RSarm, RScet, RSlsv, RSmsr, RSmip \right\rangle,$$

где *RSarm* – множество навыков по восстановлению *Arm*,

$$RSarm = \left\{ ra_1, ra_2, ..., ra_{rk}; rsv_1, rsv_2, ..., rsv_{rs} \right\};$$

RScet – множество навыков по восстановлению *Cet*,

$$RScet = \left\{ rc_1, rc_2, ..., rc_{rm}; rca_1, rca_2, ..., rca_{sk}; rcf_1, rcf_2, ..., rcf_{sf} \right\};$$

RSlsv – множество навыков по восстановлению *Lsv*,

$$RSlsv \subseteq Arm \times Cet;$$

RSmsr – навык по восстановлению *Msv*;

RSmip – навык по восстановлению *Mirz*;

T_{rs}^{dr} – совокупность директивных временных интервалов восстановления элементов АС,

$$T_{rs}^{dr} = \left\{ T_{rsa}^{dr}, T_{rsc}^{dr}, T_{rsl}^{dr}, T_{rss}^{dr}, T_{rsi}^{dr} \right\},$$

где T_{rsa}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для восстановления элементов *Arm*;

T_{rsc}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для восстановления элементов *Cet*;

T_{rsl}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для восстановления *Lsv*;

T_{rss}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для восстановления *Msv*;

T_{rsi}^{dr} – множество временных интервалов, отводимых для восстановления *Mirz*;

P_{rs}^{dr} – совокупность вероятностных характеристик того, что за указанное директивное время будут восстановлены элементы АС,

$$P_{rs}^{dr} = \left\{ P_{rsa}^{dr}, P_{rsc}^{dr}, P_{rsl}^{dr}, P_{rss}^{dr}, P_{rsi}^{dr} \right\},$$

где P_{rsa}^{dr} – вероятности восстановления элементов *Arm* за T_{rsa}^{dr};
P_{rsc}^{dr} – вероятности восстановления элементов *Cet* за T_{rsc}^{dr};
P_{rsc}^{dr} – вероятности восстановления *Lsv* за T_{svp}^{dr};
P_{rss}^{dr} – вероятности восстановления *Msr* за T_{rss}^{dr};
P_{rsc}^{dr} – вероятности восстановления *Mirz* за T_{rsc}^{dr}.

Rev – отношение $Rev : Elem \times SR \times T_{rs}^{dr} \to P_{rs}^{dr}$, на основе которого строится тензор *R*, где элемент $R[i,k,l] = Rev(elem, sr, t) = p \,|\, p \in P_{rs}^{dr}$ хранит вероятность p из отображения *Rev* (где индекс i – идентификатор восстанавливаемого элемента АС $Elem = Arm \cup Cet \cup Lvs \cup \{Msr\} \cup \{Mirz\}$, индекс k – идентификатор *SR*, индекс l – идентификатор T_{rs}^{dr}).

Найти: пространство рациональных решений Ξ*, определяемое как множество таких конфигураций системы ξ = (*Mst_ξ*, *Plan_cm*, *Plan_rest*), для которых вероятность выполнения целевых функций *Zsr* в условиях воздействия *Mth* поддерживается не ниже заданного гарантированного уровня *Pgr* на всем интервале моделирования *T*:

$$\Xi^* = \mathrm{Argmax}_{\xi \in \Xi_{доп}} F(\xi).$$

Здесь Ξ – множество всех возможных архитектурных конфигураций системы, получаемых реконфигурацией исходной *Mst*;

ξ – конкретная конфигурация (точка в пространстве решений),

$$\xi = (Mst_\xi, Plan_cm, Plan_rest),$$

где *Mst_ξ* – модифицированная структура АС;
Plan_cm – план применения контрмер, *Plan_cm* ⊆ *Mcm;*
Plan_rest – план восстановительных мероприятий, *Plan_rest* ⊆ *Msv;*

$F(\xi)$ – целевой функционал устойчивости, представляющий собой взвешенную сумму двух показателей,

$$F(\xi) = w1 * Css(\xi) + w2 * K_{Zsr}(\xi);$$

w – весовые коэффициенты, отражающие важность каждого показателя,

$$w1 + w2 = 1;$$

$\Xi_{доп}$ – множество допустимых решений,

$$\Xi_{доп} = \{\xi \in \Xi \,|\, T^{rw}(\xi) \le T_{rs}^{dr}, T^{rc}(\xi) \le T_{sv}^{dr}, \forall t \in T : Pex(Zsr, Mst(\xi), St_\xi(t)) \ge Pgr\};$$

Pex – вероятность выполнения целевых задач *Zsr* в момент *t* для конфигурации ξ в состоянии *St_ξ*(*t*), *Pex*(*Zsr*, *Mst_ξ*, *St_ξ*(*t*)). Рассчитывается на основе модели работоспособности (через анализ достижимости в графе состояний с учетом *Css*(*t*) и связности *Lpr*);

St_ξ(*t*) – состояние системы в момент *t* при конфигурации ξ. Это состояние является результатом симуляции дуэльного процесса:

$$St_\xi(t) = Simul(Mst_\xi, Mth, Plan_cm, Plan_rest, t);$$

Pgr – заданный порог гарантированной вероятности выполнения *Zsr*;

T^{rw} – совокупность временных интервалов, затраченных на закрытие уязвимости,

$$T^{rw} = \left\{T_a^{rw}, T_c^{rw}, T_p^{rw}\right\},$$

где T_a^{rw} – множество временных интервалов, за которое устранены выявленные уязвимости в *Arm*;

T_c^{rw} – множество временных интервалов, за которое устранены выявленные уязвимости в *Cet*;

T_p^{rw} – множество временных интервалов, за которое устранены выявленные уязвимости в Pr;

T^{rc} – совокупность директивных временных интервалов восстановления элементов АС,

$$T^{rc} = \left\{T_a^{cr}, T_c^{rc}, T_l^{rc}, T_s^{rc}, T_j^{rc}\right\},$$

где T_a^{cr} – множество временных интервалов, за которые восстановлена работоспособность элементов *Arm*;

T_c^{rc} – множество временных интервалов, за которые восстановлена работоспособность элементов *Cet*;

T_c^{rc} – множество временных интервалов, за которые восстановлена работоспособность *Lsv*;

T_s^{rc} – множество временных интервалов, за которые восстановлена работоспособность *Msr*;

T_j^{rc} – множество временных интервалов, за которые восстановлена работоспособность *Mirz*;

Css – интегральное значение состояния системы за период моделирования *T* для конфигурации ξ, рассчитанное по методике [4];

K_{Zsr} – коэффициент выполнения задач, рассчитанный методом Монте-Карло как средняя доля успешно выполненных задач *Zsr* за *N* испытаний.

В предлагаемой модели устойчивость АС формализуется как векторный критерий (*Css*, K_{Zsr}), в состав которого входят следующие показатели:

Css (состояние системы) – интегральный показатель стабильности архитектуры. Он оценивает работоспособность элементов *Arm*, *Cet*, *Lvs* и их связей, непосредственно отражая способность системы сопротивляться деградации и разрушению под воздействием угроз;

K_{Zsr} (коэффициент выполнения задач) – итоговый показатель функциональной эффективности. Он измеряет долю успешно выполненных целевых ЦУ ТП *Zsr*, тем самым характеризуя способность системы сохранять полезность в условиях противоборства.

Максимизация обоих показателей в условиях заданных ограничений (времени реакции, ресурсов) и составляет суть задачи обеспечения устойчивости.

Таким образом, на рассматриваемом интервале времени *t* необходимо найти рациональное решение ξ* ∈ Ξ*, которое обеспечивает наилучший баланс между поддержанием высокого уровня работоспособности $Css(\xi) \to \max_{\xi \in \Xi_{доп}}$ и максимизации выполнения целевых функций $K_{Zsr}(\xi) \to \max_{\xi \in \Xi_{доп}}$, при том, что вероятность выполнения *Zsr* удовлетворяет условию $Pex \geq Pgr$, не нарушая заданных сроков реагирования на инциденты и устранения уязвимостей.

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ И СИНТЕЗА УСТОЙЧИВОЙ АРХИТЕКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ДУЭЛЬНОГО ПРОТИВОБОРСТВА

Наглядное представление взаимосвязи ключевых параметров модели, используемых для определения Ξ*, приведено на рис. 2–4.

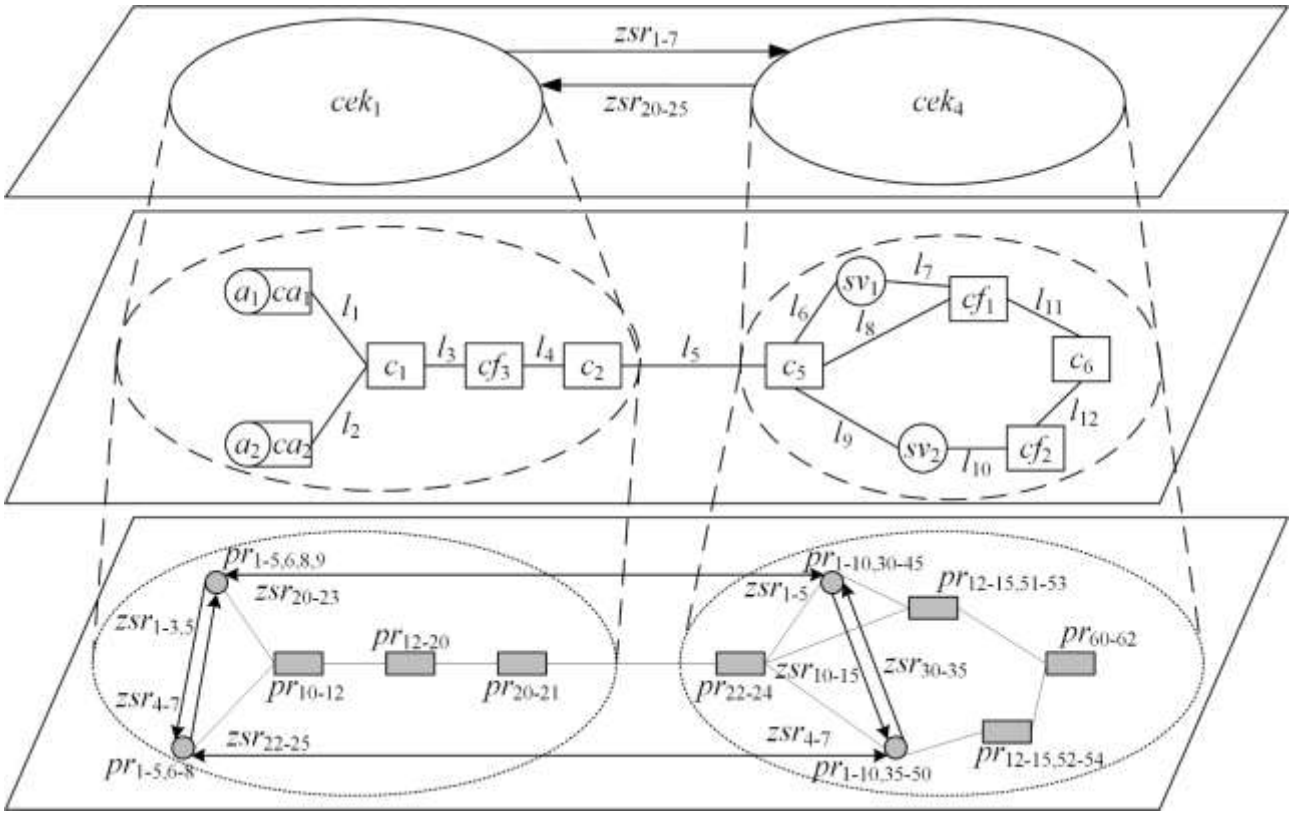


Рис. 2. Структурная схема объекта исследования (АС)

В верхней части рис. 2 отображен уровень управления, на котором происходит обмен результатами выполнения задач в рамках секторов, выполняющих целевые функции АС. В средней части представлена топологическая структура АС ($\langle Arm, Cet, Lsv \rangle$). В нижней части – информационная структура, состоящая из множества процессов *Pr*, обеспечивающих выполнение задач *Zsr* ЦУ ТП.

Эволюция АС в процессе эксплуатации, обусловленная множеством факторов, часто приводит к деградации ее первоначально оптимальной архитектуры. Ключевым механизмом компенсации таких изменений выступает реконфигурация [2]. Наиболее сложный и динамичный класс задач, требующий применения реконфигурации, – это активное противодействие кибератакам в реальном времени. В контексте противостояния интеллектуальному нарушителю реконфигурация становится основой для адаптивной защиты. Это формирует дуэльную ситуацию (рис. 3), где обе стороны вовлечены в непрерывное осмысленное противоборство с взаимной адаптацией стратегий.

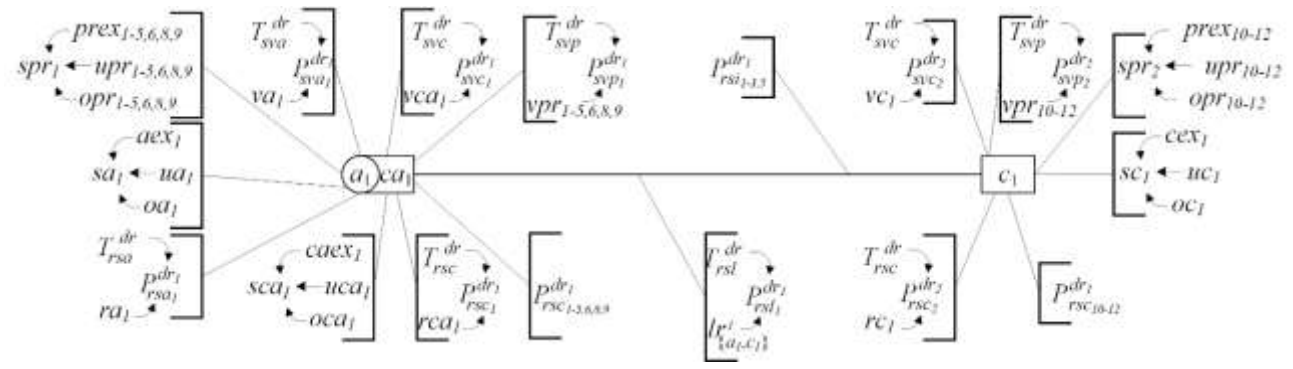


Рис. 3. Формальное описание дуэльной ситуации «объект – нарушитель»

Этот цикличный процесс противоборства можно представить как последовательность ходов:

– нарушитель проводит разведку, ищет уязвимости;

– АС применяет контрмеры для срыва атаки (скрыть истинную информацию, выставить ложные цели);

– нарушитель выбирает вектор атаки, пытается эксплуатировать уязвимость;

– АС – применяет контрмеры для блокировки и изоляции атаки, нейтрализует угрозу, а система восстановления устраняет последствия воздействия;

– нарушитель анализирует неудачу, адаптирует методы, пробует новый вектор атаки;

– АС – применяет контрмеры для совершенствования модели угроз и усиления защиты, а система восстановления совершенствует архитектуру под возможности противодействия нарушителю.

Для эффективного управления динамической реконфигурацией и оценки последствий каждого «хода» в дуэльной ситуации разработан аппарат оценки состояний системы [4]. Сначала формируется массив состояний, характеризующий состояние элементов АС в ходе дуэльной ситуации «объект – нарушитель» (рис. 4). Элементы системы переходят в одно из четырех состояний: р – работоспособен; ро – работоспособен с ограничением по функционалу; нв – неработоспособен, возможно восстановление; нн – неработоспособен, восстановление невозможно. Данные состояния рассчитываются на основе цепей Маркова. Затем, на основе матрицы информационных трактов *Mip* и с применением аппарата алгебры логики, оценивается возможность выполнения совокупности задач *Zsr* в течение заданного временного интервала. При этом также учитывается влияние нарушителя на процессы и их взаимосвязи, зависящие от состояния элементов АС, которые отражаются на результате выполнения целевых задач.

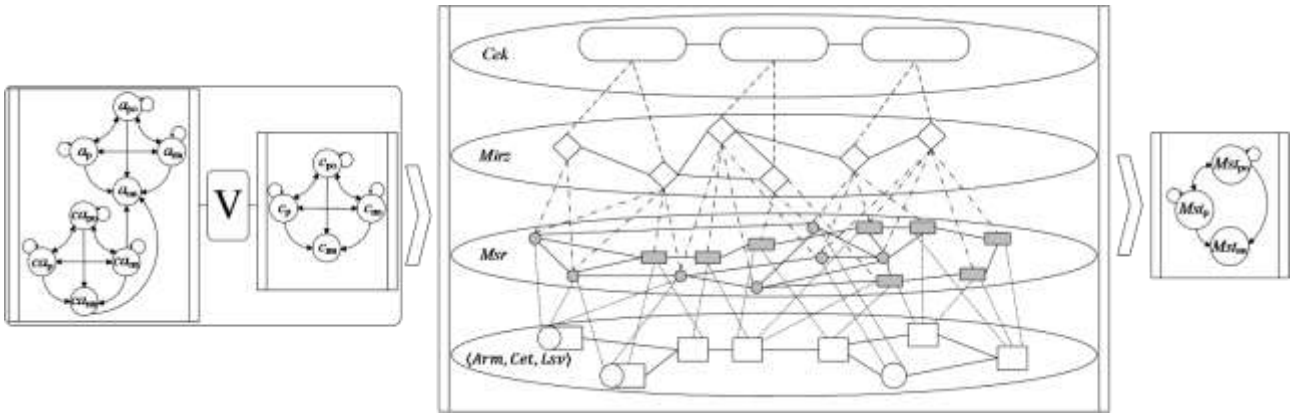


Рис. 4. Взаимосвязь состояний элементов и архитектурной целостности системы

Моделирование перехода АС в то или иное состояние работоспособности осуществляется на основе логико-вероятностного подхода [4] с учетом возможности проведения ЦУ ТП. Мероприятия по восстановлению работоспособности системы включают анализ структурной избыточности и возможности перестроения алгоритмов выполнения задач на следующий временной промежуток. Осуществляется прогноз дальнейших действий нарушителя, т. е. вероятностная оценка наиболее рациональных следующих шагов злоумышленника в рамках выявленных паттернов и тактических моделей [6–9]. По необходимости вносятся коррективы в контрмеры: изменяются параметры разграничения доступа, актуализируются настройки средств антивирусной защиты информации и программно-аппаратных средств от несанкционированного доступа в систему и т. д. На основании проведенных расчетов и анализа поведения нарушителя, а также сформированных множеств состояния элементов системы, множества маршрутно-адресных связей между процессами *Lpr* и их критичности *Kpr* для реали-

зации задач *Zsr* с учетом матрицы информационных трактов *Mip* производится синтез архитектур *Mst*. Далее, строится множество допустимых решений с учетом $T^{rw} \le T^{dr}_{rs}$ и $T^{rc} \le T^{dr}_{sv}$, из него формируется пространство решений Ξ* на основе критериев *Css* → max и $K_{Zsr} \to \max$, из которого выбирается рациональное ξ*. Временной интервал, затрачиваемый на реконфигурацию, не должен превышать период одного «хода» дуэльной ситуации.

Для верификации предложенного подхода было проведено имитационное моделирование АС с использованием разработанного программного обеспечения [5] при различных условиях применения контрмер и системы восстановления от воздействия нарушителя. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 5–12. Состояние АС оценивалось по нормированной трехбалльной шкале: 3 – работоспособна (задачи ЦУ ТП выполняются), 2 – ограниченно работоспособна (высокий риск срыва ЦУ ТП), 1 – неработоспособна (ЦУ ТП не выполняется). По оси абсцисс отображены временные интервалы моделирования дуэльной ситуации.

На рис. 5 изображен график результатов эксперимента № 1, характеризующий устойчивость системы, исходя из возможности противника воздействовать на все элементы АС, при этом не применяются контрмеры и мероприятия по восстановлению.

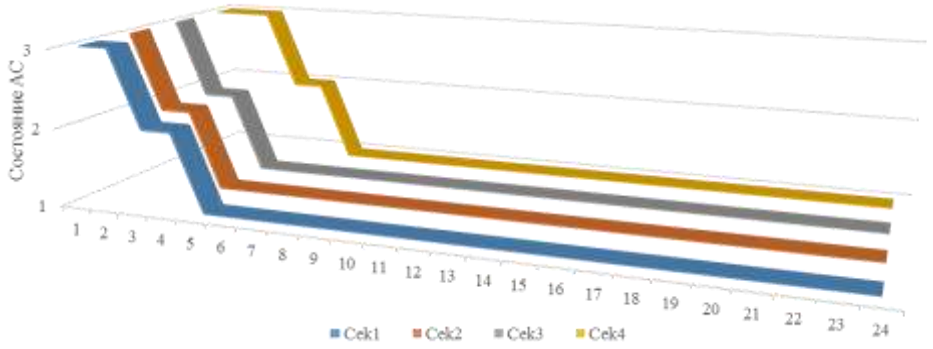


Рис. 5. Результат моделирования АС (без контрмер и восстановления)

На рис. 6 изображен график результатов эксперимента № 2, характеризующий устойчивость системы, исходя из возможности противника воздействовать на все элементы АС, при этом выполняются только мероприятия по восстановлению. Устойчивость системы повысилась на 11%.

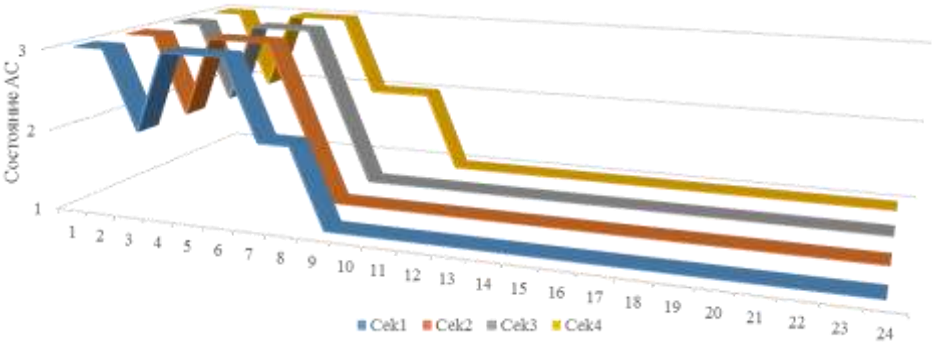


Рис. 6. Результат моделирования АС (только мероприятия восстановления)

На рис. 7 изображен график результатов эксперимента № 3, характеризующий устойчивость системы, исходя из возможности противника воздействовать на все элементы АС, при этом выполняются только контрмеры. Устойчивость системы повысилась на 16%.

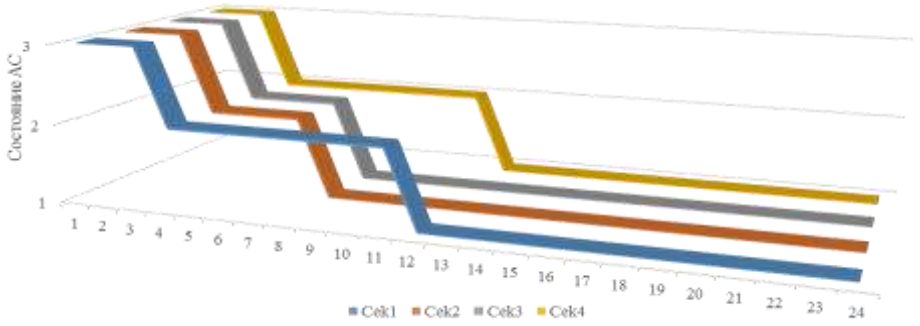


Рис. 7. Результат моделирования АС (только контрмеры)

На рис. 8 изображен график результатов эксперимента № 4, характеризующий устойчивость системы, исходя из возможности противника воздействовать на все элементы АС, при этом выполняются как мероприятия по восстановлению, так и контрмеры. Устойчивость системы повысилась на 32%.

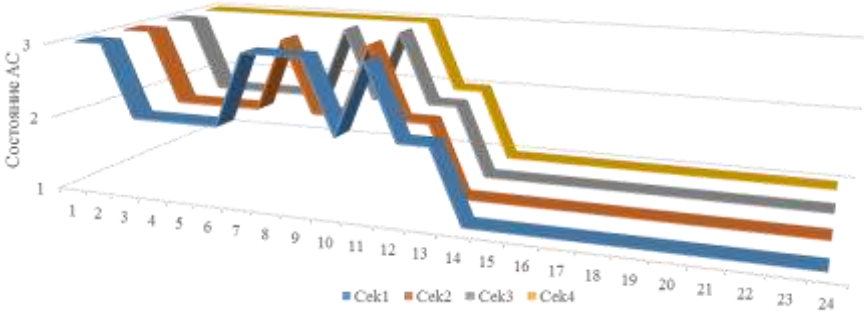


Рис. 8. Результат моделирования АС
(с применением контрмер и мероприятий по восстановлению)

На рис. 9–12 представлены результаты моделирования при условии того, что противник ограничен в возможности обнаружения элементов АС из-за применения проактивных мер информационной защиты (ложные сети, эшелонированная защита конечных точек, упреждающее управление уязвимостями и угрозами и т. д.). Применение проактивных мер дает время на обнаружение и блокировку действий нарушителя, а также отвлекает его от реальных целей.

На рис. 9 изображен график результатов эксперимента № 5, характеризующий устойчивость системы, исходя из ограниченной возможности противника воздействовать на элементы АС, при этом не применяются контрмеры и мероприятия по восстановлению.

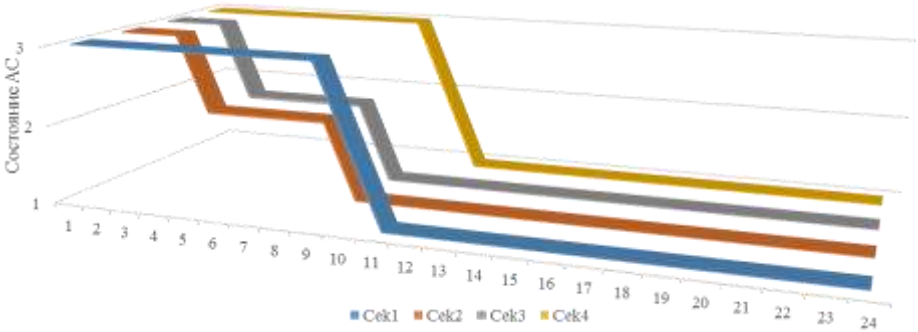


Рис. 9. Результат моделирования АС с использованием проактивных мер
(без контрмер и восстановления)

На рис. 10 изображен график результатов эксперимента № 6, характеризующий устойчивость системы, исходя из ограниченной возможности противника воздействовать на элементы АС, при этом выполняются только контрмеры. Устойчивость системы повысилась на 10%.

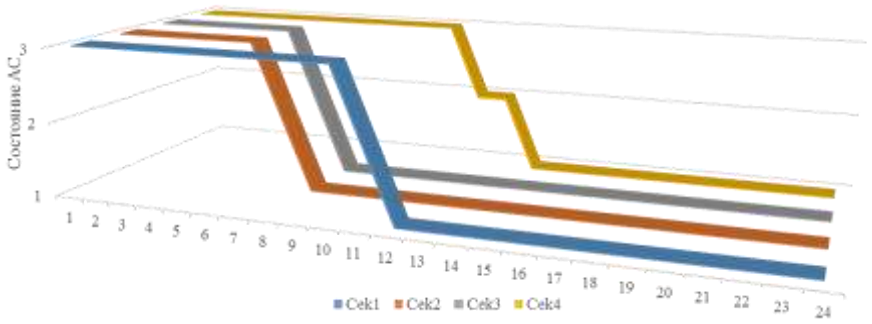


Рис. 10. Результат моделирования АС с использованием проактивных мер (только контрмеры)

На рис. 11 изображен график результатов эксперимента № 7, характеризующий устойчивость системы, исходя из ограниченной возможности противника воздействовать на элементы АС, при этом выполняются только мероприятия по восстановлению. Устойчивость системы повысилась на 42%.

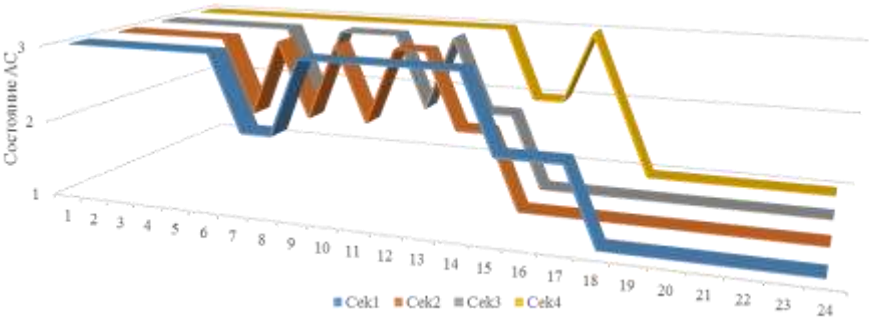


Рис. 11. Результат моделирования АС с использованием проактивных мер (только мероприятия восстановления)

На рис. 12 изображен график результатов эксперимента № 8, характеризующий устойчивость системы, исходя из ограниченной возможности противника воздействовать на элементы АС, при этом выполняются как мероприятия по восстановлению, так и контрмеры. Устойчивость системы повысилась на 76%.

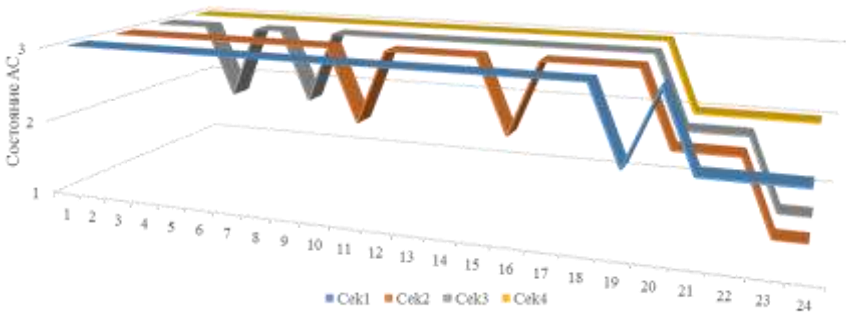


Рис. 12. Результат моделирования АС с использованием проактивных мер (с применением контрмер и мероприятий по восстановлению)

Сводные результаты всех экспериментов по показателю K_{Zsr} представлены на рис. 13. Наибольшая эффективность достигнута в экспериментах с комплексным применением мер: приблизительно 38% без проактивной защиты (эксперимент № 4) и примерно 82% с ее использованием (эксперимент № 8). Это подтверждает синергетический эффект контрмер и восстановления, а также значимую роль проактивного ограничения возможностей нарушителя.

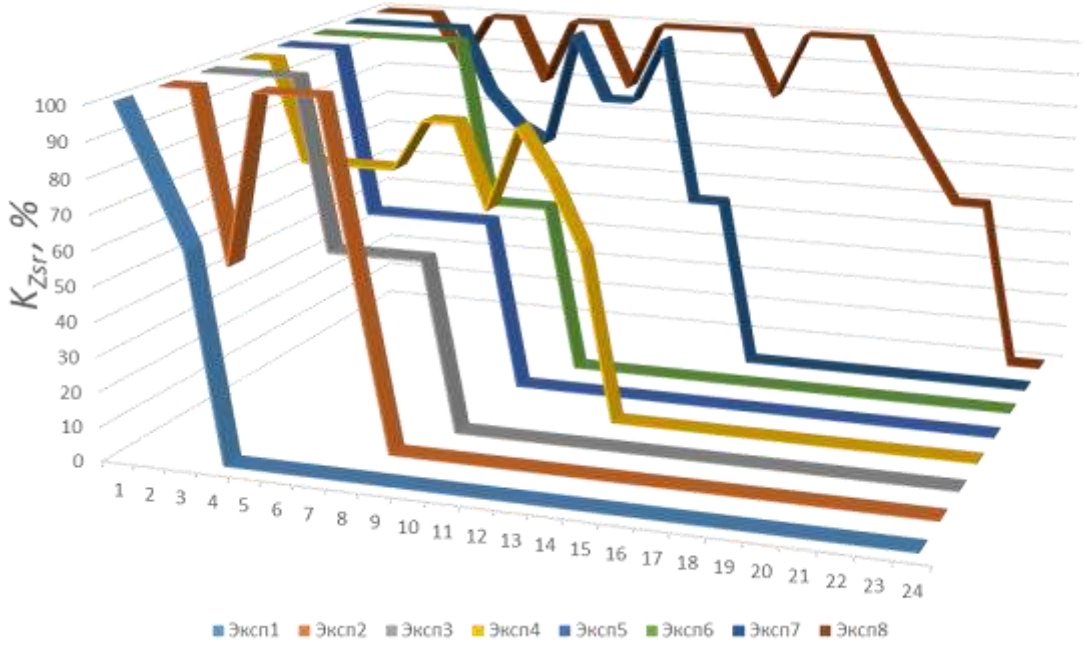


Рис. 13. Значение K_{Zsr}, %

Результаты экспериментов (рис. 5–13) демонстрируют, как меры защиты влияют на компоненты устойчивости:

– контрмеры *Mcm* напрямую повышают *Css*, предотвращая переход элементов в неработоспособное состояние;

– механизмы восстановления *Msv* обеспечивают рост K_{Zsr}, сокращая время простоя и возвращая системе функциональность;

– проактивные меры (маскировка) значительно улучшают оба показателя, затрудняя нарушителю выбор целей.

Синергетический эффект от комплексного применения мер защиты (в экспериментах № 4 и № 8) подтверждает, что устойчивость достигается только при одновременном укреплении как структурной живучести *Css*, так и функциональной доступности (K_{Zsr}) системы.

Предложенный теоретико-множественный подход и формализованный цикл адаптивного управления демонстрируют возможность существенного повышения устойчивости АС в условиях целенаправленного киберпротивоборства за счет динамической интеллектуальной реконфигурации.

Наибольшая эффективность достигается при синергетическом применении активных контрмер *Mcm* и системы восстановления *Msv*, что количественно подтверждается максимальным ростом ключевых показателей – состояния системы *Css* и коэффициента выполнения задач K_{Zsr} – в экспериментах № 4 (+32%) и № 8 (+76%). При этом использование проактивных мер, ограничивающих возможности разведки нарушителя, является фактором, позволившим увеличить интегральную эффективность защиты K_{Zsr} от приблизительно 38% до примерно 82%.

Таким образом, результаты работы подтверждают практическую ценность формального моделирования дуэльной ситуации «объект – нарушитель» для задач синтеза оптимальных архитектур и разработки адаптивных стратегий противодействия современным киберугрозам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована проблема обеспечения устойчивости автоматизированных систем управления в условиях адаптивного противодействия целевого нарушителя. В отличие от традиционных подходов, предложена модель, рассматривающая безопасность как динамическое дуэльное противостояние.

Основным научным результатом является разработка комплексного теоретико-множественного подхода, формализующего в едином пространстве решений Ξ^* структуру АС *Mst*, модель угроз *Mth*, а также системы контрмер *Mcm* и восстановления *Msv*. Для моделирования динамики состояний системы применен аппарат цепей Маркова, позволивший количественно оценивать ее работоспособность в ходе атаки.

Имитационное моделирование подтвердило эффективность подхода и позволило сделать следующие выводы.

1. Комплексное применение контрмер и восстановления обеспечивает синергетический эффект, увеличивая общую устойчивость *Css* и K_{Zsr} до 32% (эксперимент № 4) по сравнению с их изолированным использованием.

2. Важным фактором является применение проактивных мер. Их использование позволило достичь максимального прироста эффективности до 76% по уровню устойчивости и повысить коэффициент выполнения задач K_{Zsr} от приблизительно 38% до примерно 82% (эксперимент № 8).

Таким образом, предложенный подход обеспечивает основу для адаптивной реконфигурации АС и формирования опережающей стратегии защиты.

Перспективными направлениями исследований являются: интеграция сложных моделей атак (MITRE ATT&CK), использование машинного обучения для прогнозирования действий нарушителя и оптимизация алгоритмов реконфигурации для минимизации времени принятия решений.

Список использованных источников

1. Cyber Resilience of Systems and Networks / A. Kott [et al.]. – Springer International Publishing, 2019. – 475 p.

2. *Растригин Л. А.* Адаптация сложных систем. – Рига : Зинатне, 1981. – 375 с.

3. Методика оценки угроз безопасности информации : метод. документ [утв. ФСТЭК России 05.02.2021]. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-5-fevralya-2021-g (дата обращения: 02.12.2025).

4. *Чащин С. В., Борунова Е. В.* Подход к решению задачи обеспечения защищенности ЛВС ПУ за счет изменения ее топологической структуры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 6. – С. 22–28.

5. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025614047. Программный комплекс по оцениванию защищенности ЛВС, функционирующей в условиях программно-математического воздействия / С. В. Чащин, Д. Р. Гарифуллин, Д. А. Кольцов, А. С. Петухов, Д. В. Трефилов, А. В. Бояндинов; заявитель и правообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – № 2025612404; заявл. 11.02.2025; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 18.02.2025.

6. *Макарова О. С., Поршнев С. В.* Методика прогнозирования динамики вероятности проведения компьютерной атаки с точки зрения нарушителя // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2022. – № 1 (43). – С. 64–73.

7. *Lukade R. R.* Attack Chain Contraction & Prediction Using Markov Model and LSTM on MITRE ATT&CK Data. – Univ. Massachusetts Dartmouth, 2025. – 283 p.

8. *Zokarkar V., Mathur K.* A Survey of Attack Prediction Approaches in Cyber Security // Proc. Int. Conf. Recent Advancements Modernisations Sustain. Intell. Technol. Appl. (RAMSITA). – 2025. – P. 1003–1016.

9. *Dass S., Datta P., Namin A. S.* Attack Prediction using Hidden Markov Model // Proc. IEEE 45th Annu. Comput., Softw., Appl. Conf. (COMPSAC). – 2021. – P. 1695–1702.

П. В. Белянкин[1];
Е. Т. Жуков[2],
кандидат технических наук
[1] АО «НПО «Обуховский Завод», г. Санкт-Петербург.
[2] Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ ЧЕРЕЗ РАДИОСТАНЦИИ ДАЛЬНЕЙ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

Данная статья подготовлена на основе доклада, сделанного авторами на IV Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы создания и применения космических аппаратов и средств выведения в интересах решения задач Вооруженных сил Российской Федерации», состоявшейся с 11 по 12 апреля 2024 г. в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.

В статье рассматриваются пути улучшения характеристик Государственной системы единого времени и эталонных частот (ГСЕВЭЧ) в части оперативности, помехоустойчивости, информативности и доступности передачи времени через радиостанции дальней навигации и связи. Новым научно-техническим решением является использование бинарной фазовой манипуляции (БФМн) для передачи с повышенной оперативностью и помехоустойчивостью меток и текущих значений времени, а также поправки для определения Всемирного времени. Это позволило сократить время обнаружения меток времени, передаваемых по радиоканалам дальней навигации, в несколько раз и уменьшить длительность сеансов передачи времени по радиоканалу дальней связи с 47 до 15 минут.

Ключевые слова: Государственная система единого времени и эталонных частот, система единого времени, шкала времени, передача времени.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач, требующих привязки пространственно-временных измерений к шкале единого времени, была создана отечественная система единого времени высокой точности (СЕВ-ВТ). Затем на ее базе и на базе средств Государственной службы времени и частоты была создана ГСЕВЭЧ [1–3]. Система предназначена для обеспечения единым временем и эталонными частотами комплексов и систем оборонного, научного и народно-хозяйственного назначения, а также совершенствования метрологического обеспечения измерения времени и частоты в Вооруженных силах и народном хозяйстве.

Термин «передача времени» используется в мировой литературе как «time transfer» без общепринятого определения. Нами предлагается его определение как совокупность действий по определению и сведению к допустимому уровню разности шкал времени (ШВ) пространственно-разнесённых объектов. Технология передачи времени через радиостанции это совокупность методов и средств по излучению, контролю, приёму и обработке сигналов времени и информации о времени в виде оцифровки ШВ (номер часа в сутках и минуты в часе) и поправки для определения Всемирного времени с целью привязки локальных ШВ к единой шкале времени.

В ГСЕВЭЧ входят средства передачи времени Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли, средства передачи времени Министерства обороны и глобальной навигационной системы (ГНСС) ГЛОНАСС (входит функционально). Средства передачи времени Министерства обороны в составе ГСЕВЭЧ включают средства СЕВ передающих станций импульсно-фазовой (ИФ) радионавигационной системы (РНС) диапазона длинных волн (ДВ) и средства СЕВ радиостанций дальней связи диапазона сверхдлинных волн (СДВ).

Методы передачи времени через наземные радиостанции навигации и связи ДВ и СДВ диапазонов существенно не развивались со времени приема в эксплуатацию системы СЕВ-ВТ (конец 70-х годов 20 века). В настоящее время необходимо создание на их основе полно-

ценного резерва средствам ГНСС, не зависящего от наличия сигнала ГНСС и обеспечивающего при этом реализацию всех необходимых функций и характеристик передачи времени. Использование данных методов для этой цели возможно только при условии совершенствования существующих методов передачи времени с доведением их показателей до требуемого уровня. Поэтому исследование путей развития методов и средств передачи времени через радиостанции дальней навигации и связи является актуальной научной задачей.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ ЧЕРЕЗ РАДИОСТАНЦИИ ДАЛЬНЕЙ НАВИГАЦИИ

Навигационные сигналы, передаваемые ДВ радиостанциями ИФРНС, представляют собой группы радиоимпульсов (РИ) с несущей частотой 100 кГц. Каждая группа состоит из восьми импульсов, следующих с периодом 1 мс. Сигналы времени передают ведущие станции цепей РНС. Период повторения групп импульсов Европейской цепи ИФРНС РНС-Е составляет 80 мс. С секундными метками передаваемой шкалы времени совмещена характерная точка t_0 фронтов восьмых (временных) импульсов групп, которая расположена в начале периода несущей с уровнем 0,6 максимального значения сигнала (рис. 1).

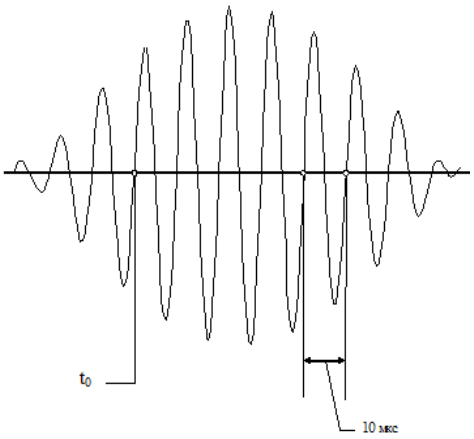
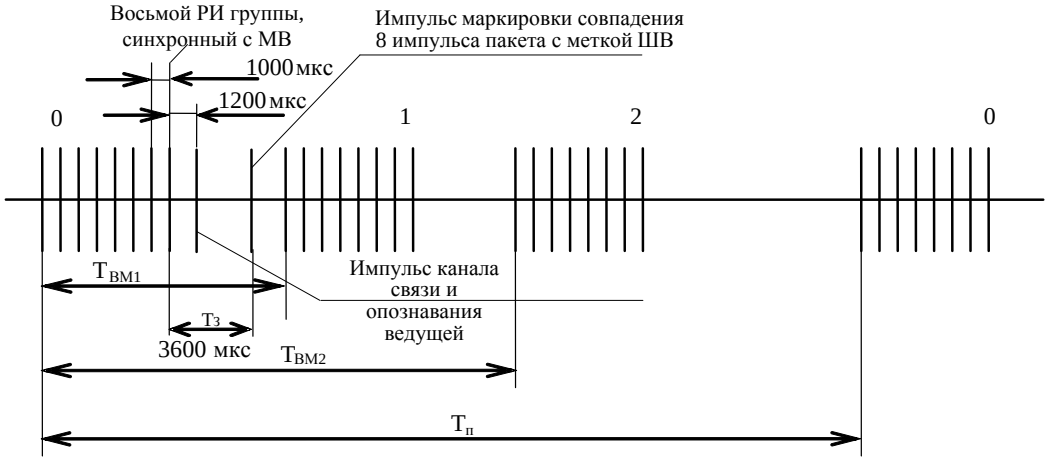


Рис. 1. Радиоимпульс ИФРНС

Сигналы ведущей станции РНС-Е (А) маркируют передачей в каждой группе дополнительного (девятого) импульса, используемого для передачи данных межстанционной служебной связи. Каждую группу импульсов РНС-Е, совпадающую с секундной меткой UTC (SU), маркируют передачей дополнительного (десятого) импульса. При совпадении с минутной меткой дополнительно маркируют следующие десять групп импульсов. Кроме того, через 12 с после совпадения с пятиминутной меткой маркируют следующие одиннадцать групп импульсов [4] (рис. 2).



0 - сигнал ведущей станции;
1,2 - сигналы ведомых станций

Рис. 2. Радиоимпульсы ведущей (ВЩ) и двух ведомых (ВМ 1, 2) станций цепей ИФРНС

В Восточной цепи ИФРНС «РНС-В» передаются группы навигационных РИ с периодом 79,5 мс. При таком значении периода совпадение восьмого импульса с секундной меткой происходит каждые 159 с, т. е. достаточно редко, что не позволяет использовать тот же метод маркировки совпадений, что и в РНС-Е. В этом случае поиск маркеров занял бы слишком много времени. Сигналы времени передаются независимо от радионавигационных сигналов в виде одиночных импульсов с периодом повторения 80 мс в моменты, не совпадающие с навигационными группами импульсов. Маркирование секундных, минутных и пятиминутных меток производится так же, как и в предыдущих случаях, с той лишь разницей, что маркирующие импульсы передаются не после навигационных групп импульсов, а после одиночных импульсов [4].

Данные методы используют амплитудную манипуляцию РИ маркировки совпадений (при совпадении импульсы есть, в остальных случаях нет). РИ маркировки при его наличии имеет известное фиксированное положение относительно группы РИ навигационного сигнала во времени и известную фазу, следовательно, его обнаружение (детектирование) можно сделать когерентным (синхронным). При отсутствии маркирующего импульса мгновенное значение выборки, снятой во время, соответствующее предполагаемому пику синусоиды, через 2,5 мкс от начала РИ маркера, распределено по несмещенному нормальному закону с нулевым математическим ожиданием m и дисперсией σ^2, обратно пропорциональной квадрату отношения сигнал/шум по амплитуде с функцией плотности вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}. \quad (1)$$

При наличии импульса его мгновенное значение распределено по смещенному нормальному закону с функцией плотности вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-1}{\sigma}\right)^2}. \quad (2)$$

При этом считаем амплитуду сигнала единичной (нормированной автоматической регулировкой усиления, АРУ). В случае когерентного обнаружителя порог принятия решения равен 0,5 независимо от отношения сигнал/шум. Для вероятности верного обнаружения 0,9973 при этом значении порога тройное СКО накопленной амплитудной выборки должно быть меньше $3\sigma = 0{,}5$, отношение сигнал/шум после накопления – $1/\sigma = 6$.

Поиск секундного маркера совпадения выполняется по 25 каналам (25 возможных положений импульса на интервале 2 с). При отношении сигнал/шум = 1 достаточно копить 72 с (накопление с суммированием в 36 раз на интервале 2 с), отношение сигнал/шум растет при этом в $\sqrt{36} = 6$ раз до необходимого значения 6/1.

Поиск минутного маркера совпадения выполняется после нахождения секундного маркера в 30 каналах (30 возможных положений группы из 10 маркеров на интервале 60 с). Маркер совпадения с минутной меткой состоит из 10 импульсов. При когерентном накоплении необходимое накопленное отношение сигнал/шум получается уже на четвертой минуте (40 импульсов), однако для подтверждения результата необходимо копить еще 6–10 мин.

Маркер 5 мин. состоит из 11 импульсов, формируемых каждые 5 мин. Для накопления в 36 раз необходимо копить как минимум 20 мин. (4 пятиминутных интервала из 11 импульсов каждый, всего 44 импульса, отношение сигнал/шум 6,6 раз). Поиск выполняется после нахождения минутного маркера в 5-минутных каналах с суммированием по 11 импульсов в каждом. С учетом необходимости подтверждения и предварительного нахождения минутного маркера получаем время поиска маркера совпадения с пятиминутной меткой 30–40 мин., что полностью соответствует практическому опыту.

Время поиска маркеров совпадений при существующих методах их передачи недопустимо велико (низка оперативность). В случае больших шумов в месте размещения приемных пунктов прием маркеров нестабилен или невозможен (низкая помехоустойчивость). Метки

шкалы времени, передаваемые с помощью маркеров, невозможно соотнести со значениями московского времени (номерами секунды, минуты, часа) – недостаточна информативность.

При модернизации средств передачи времени «РНС-В» в конце 80-х годов в оборудовании передающей станции был реализован метод маркировки совпадений 8 импульса с секундной меткой, основанный на корреляционных свойствах псевдослучайных последовательностей [5]. В нем перед совпадением начала восьмого РИ группы с секундной меткой UTC(SU) 127 предшествующих ей групп РИ ведущей станции подряд маркируются излучением дополнительных РИ, задержка которых относительно восьмых РИ группы составляет 2400 мкс. Для помехоустойчивой идентификации группы навигационных РИ, на восьмых периодах которой происходит совпадение с секундой, дополнительные РИ кодированы по фазе по закону 127-элементной псевдослучайной последовательностью (ПСП) минимальной длины (М-последовательности). По сравнению с методами с амплитудной манипуляцией фазовая манипуляция более помехоустойчива (создает в два раза большее межсимвольное расстояние в векторном пространстве сигналов). Использование ПСП позволяет при значительном объеме накопления (127 импульсов) избежать влияния синхронных помех. Декодирование маркера становится возможным при отношении сигнал/шум 0,1 и менее. Данный метод в настоящее время не применяется.

В работе [5] предложена модификация этого метода для применения его в цепи РНС-Е на основном навигационном периоде для маркировки совпадения восьмых импульсов группы с минутной меткой ШВ. Передачу информации о времени суток и поправки для определения Всемирного времени предложено реализовать с помощью бинарной фазовой манипуляции (БФМн) девятого импульса служебной связи. При этом отпадает необходимость в передаче маркера совпадения с меткой времени «5 минут». Для передачи ПСП минутного маркера предлагается также использовать бинарную фазовую манипуляцию 30 радиоимпульсов маркировки совпадений с одной секундой ШВ.

При фазовой манипуляции порог принятия решения в когерентном декодере равен нулю, поскольку выборки сигналов, передающих символы «0» и «1», имеют противоположный знак и симметричны относительно нулевого значения, в том числе в смеси с шумом:

– при передаче «1»

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-1}{\sigma}\right)^2}; \quad (3)$$

– при передаче «0»

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x+1}{\sigma}\right)^2}. \quad (4)$$

Для вероятности верного обнаружения 0,997 (при СКО σ = 1/3) отношение сигнал/шум после накопления должно быть не менее $1/\sigma = 3$. Поскольку используется фазовая манипуляция маркеров, когерентное обнаружение секундных маркеров становится возможным только после поиска всего кода ПСП. При этом когерентное накопление с корреляцией с кодом должно выполняться на минутном интервале с учетом кода корреляционной функции в 25 каналах возможного положения секундного маркера и в 30 каналах положения ПСП минутного маркера, итого в 750 каналах. В каждом из 750 каналов выполняется расчет корреляционной функции:

$$R = \sum_{i=1}^{30} x_i k_{[i+j]_{n=30}}, \quad (5)$$

где k_i – значение элемента i-го кода ПСП;

x_i – амплитудная выборка сигнала, принятого на позиции маркерного импульса.

В формуле (5) $[i+j]_{n=30}$ означает остаток при суммировании по модулю 30, например $[28+5]_{n=30} = 3$.

Номер канала j при расчете корреляционной функции R в каждом из каналов остается фиксированным, это номер канала параллельного поиска по коду.

Для каждого из 30 возможных значений смещения кода ПСП j выполняется 25 сдвигов по возможным положениям секундного маркера на интервале 2 с. Секундный маркер с фазовой манипуляцией и минутный код ПСП будут обнаружены в одном из этих 750 каналов по максимуму суммы, в других каналах секундного импульса нет. При таком методе передачи вероятность верного обнаружения маркеров совпадения точки слежения восьмого радиоимпульса группы с секундной и минутной метками шкалы времени составляет 0,997 при накоплении до отношения сигнал/шум 0,316 на интервале накопления 1 мин. При увеличении времени накопления отношение сигнал/шум обратно пропорционально корню из времени накопления.

Приведенные выше расчеты показали, что поиск фазы кода ПСП, однозначно характеризующей группу РИ ведущей станции РНС-Е, на которой начало фронта восьмого РИ совпадает с меткой ШВ «1 минута», происходит при отношении сигнал/шум = 1 за одну минуту, т. е. один цикл кода ПСП. Для подтверждения результата поиска корреляционная функция вычисляется еще на второй-третьей минутах. Таким образом, при использовании для маркировки совпадений группы РИ с минутной меткой ФМн ПСП время ее поиска сокращается в 10–15 раз. Кроме того, использование ФМ ПСП существенно снижает вероятность поражения приема маркеров при воздействии весьма вероятных в ДВ диапазоне сосредоточенных во времени синхронных импульсных помех и сосредоточенных по спектру синхронных синусоидальных помех. Поскольку предложенный метод предусматривает передачу оцифровки времени до секунд и даты, нет необходимости в приеме пятиминутного маркера.

Выбор кода ПСП для маркера минуты осложняется тем, что М-последовательности имеют длину 2^n-1, при укорочении или изъятии элементов для получения требуемой длины 30 битов их автокорреляционная функция (АКФ) существенно искажается. Аналитических методов получения ПСП кодов произвольной длины с хорошими корреляционными свойствами не существует. Их можно найти только прямым перебором, что при необходимой длине кода 30 бит уже достаточно трудоемко, но еще возможно. Для получения 30-битовых ПСП были рассчитаны АКФ $R(j)$ для каждого из перебранных с инкрементом 1 от 0000000_h до 2^{30} возможных значений чисел, соответствующих кодам ПСП длиной 30 бит:

$$R(j) = \sum_{i=1}^{30} k_i k_{[i+j]_{n=30}}, \quad (6)$$

где $[i+j]_{n=30}$ означает остаток при суммировании по модулю 30.

Варианты псевдослучайной последовательности для кодирования маркеров минут в сигналах ИФРНС были выбраны, исходя из критерия минимального уровня боковых лепестков АКФ. Шестнадцатеричные коды (обозначаемые нижним индексом $_h$) от 0_h до F_h – символьные обозначения групп по 4 бита, от 0000 до 1111, первые 10 цифр соответствуют десятичному коду, затем A, B, C, D, E, F. В табл. 1 приведено два наилучших из найденных вариантов кодовых последовательностей с уровнем боковых лепестков, не превышающим 7%-го уровня максимума АКФ, а на рис. 3 – график АКФ одного из вариантов ПСП, в коде «0» соответствует фаза 0°, «1» – фаза 180°.

Таблица 1

Значения кодов (0/1) 30-элементных псевдослучайных последовательностей для кодирования маркера минуты

Вариант	Номера разрядов							
	0-1	2–5	6–9	10–13	14–17	18–21	22–25	26–29
	Шестнадцатеричные значения кодов ПСП							
1	0	7	2	6	A	5	F	F
2	0	4	A	5	C	5	F	F

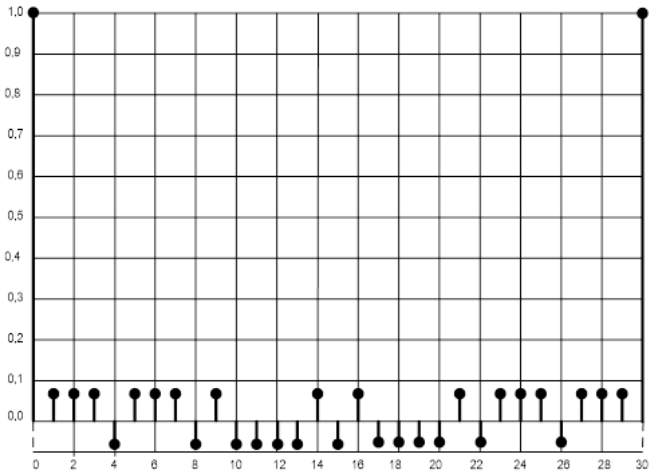


Рис. 3. Автокорреляционная функция ПСП (вариант 1)

В настоящее время в составе сигнала ИФРНС не передается необходимая пользователю информация, поправка для определения Всемирного времени и оцифровка шкалы времени – номера минуты в часе и часа в сутках.

В задачах геодезии и астронавигации, связанных с астрономическими наблюдениями, используется Всемирное время UT1. Оно может быть получено потребителем из времени его хранителя, синхронизированного с UTC(SU), при использовании поправки для определения всемирного времени DUT1, которая для этого должна быть ему передана. Сейчас поправка для определения Всемирного времени передается ГНСС и в составе сигнала радиостанций Росстандарта (ГСВЧ) РБУ (ДВ диапазон), РТЗ и РВМ (КВ диапазон) [4]. Потребности объектов Министерства обороны в этой информации требуют резервирования ее передачи через радиостанции навигации и связи ДВ и СДВ диапазонов, имеющие в своем составе средства СЕВ ГСЕВЭЧ «Цель». Для передачи поправки с целью определения Всемирного времени потребителю в составе сигнала ИФРНС при совершенствовании ГСЕВЭЧ предложено [5] использовать канал служебной связи (девятый радиоимпульс группы).

Передачу значений времени в пределах суток предлагается реализовать с помощью фазового кодирования номером минуты в часе передаваемых сейчас без модуляции 10 импульсов маркировки совпадения временного импульса с минутной меткой и номером часа в сутках 11 импульсов маркировки совпадения его с меткой времени «300 секунд». Для передачи номера минуты нужно 6 битов, для передачи номера часа 5 битов. Незадействованные для этого 4 бита минутного маркера и 6 битов пятиминутного маркера используются для защиты от ошибок при передаче кодом Хэмминга. Декодирование информации о времени суток и поправки для определения Всемирного времени возможно при отношении сигнал/шум не менее 3 при вероятности верного приема на бит 0,9973.

Погрешность привязки шкалы времени имеет случайную и систематическую составляющие. Случайная погрешность невелика. Для стационарных объектов с высокостабильными опорными генераторами, какими являются приемные пункты СЕВ, возможно сужение полосы следящей системы (или увеличение времени накопления). При этом СКО слежения за фазой снижается до единиц или десятков наносекунд.

Точность привязки ограничена в основном погрешностью расчета времени поверхностного распространения радиоволн. На практике часто используется эмпирическая формула, в соответствии с которой время распространения (в микросекундах) t_p составляет

$$t_{\text{р}} = \frac{R}{0{,}299692} + t_{\text{доп.}}\frac{R}{1000}, \qquad (7)$$

где R – длина трассы распространения, км;

299692 – групповая скорость распространения, км/с [6];

$t_{доп}$ – множитель дополнительной задержки, в микросекундах на 1000 км (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость $t_{доп}$ (мкс) от проводимости почвы при расстоянии 1000 км

$\sigma \cdot 10^3$, См/м$^{-1}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{доп}$, мкс	7,2	6,3	5,7	5,2	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,9

Значение проводимости почвы σ меняется в зависимости от трассы распространения, погодных условий и времени года. Погрешность расчета по формуле (7) достигает 1-2 мкс. Более точная модель распространения приведена в [6].

В свободном пространстве скорость распространения сигнала равна скорости света *c,* ε_0 и μ_0 – начальные диэлектрическая и магнитная проницаемости:

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = 299792{,}5 \text{ км/с}; \ \varepsilon_0 = \frac{1}{36}\cdot 10^{-9} \text{ Ф/м}; \ \mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7} \text{ Г/м}. \quad (8)$$

Скорость распространения радиоволн в атмосфере v_a меньше *c* и зависит от значения коэффициента преломления *n*. Для стандартной атмосферы при $P = 760$ мм рт. ст., $t^0 = 15^0$C, упругости водяного пара $e = 8{,}8$ мм, относительной влажности $s = 70\%$, $n = 1{,}000326$ и $v_a = 299695$ км/с время распространения равно $t_r = r/v_a$.

Коэффициент преломления *n* зависит от состояния атмосферы:

– при увеличении температуры на 10^0C скорость v_a растет на 3 км/с;

– при увеличении давления на 10 мм рт. ст. скорость v_a снижается на 0,81 км/с;

– при увеличении влажности на 1% скорость v_a снижается на 1,35 км/с.

В зарубежных источниках величину, обратную *n*, называют первичным фактором (множителем) – *Primary Factor* (PF).

Скорость фронта радиоволны над морем $v_ф$ меньше v_a из-за влияния подстилающей поверхности, обуславливающей дополнительную задержку $t_{доп.}$ Общая задержка сигнала составляет

$$t_r = \frac{r}{v_a} + \tau_{доп} = \frac{r}{v_ф}. \quad (9)$$

Скорость распространения фронта сигнала ИФРНС над поверхностью моря

$$v_ф = \frac{v_a}{1 + \tau_{доп}\dfrac{v_a}{r}} \approx v_a - \frac{v_a^2}{r}\tau_{доп} = v_a - \Delta v. \quad (10)$$

Поправка к скорости распространения зависит от расстояния от излучателя. В среднем в расчетах для нее используется значение -147 км/с, при этом скорость распространения становится равной 299548 км/с. Множитель, соответствующий этой величине, в зарубежных публикациях называют вторичным – *Secondary Factor* (SF).

Поверхность суши характеризуется значительным разбросом значений проводимости почвы, что может быть точно учтено интегрированием функции задержки от проводимости почвы по трассе распространения сигнала или приблизительно при кусочно-линейной аппроксимации. Для каждого из участков пути распространения радиоволны с примерно одинаковой проводимостью определяют дополнительный множитель – *Additional Secondary Factor* (ASF), характеризующий поправку к скорости распространения на этом участке.

Точный расчет времени распространения сигнала требует использования параметров атмосферы и знания актуальных значений проводимости почвы, зависящей от ее состава и погодных условий по каждому из участков трассы, и следовательно практически неприменим.

Возможна калибровка скорости распространения путем использовании дифференциального режима. Известны способы построения дифференциальной ИФРНС с передачей дифференциальных поправок от дифференциальной станции (ДС) на передающую станцию с помощью дополнительного канала связи и синхронизации ДС по ГНСС [7], что создает зависимость использования метода от внешних служб и систем связи. Для полноценного независимого от ГЛОНАСС резервирования ее функций необходима реализация калибровки времени распространения сигнала средствами Министерства обороны. Нами предложен новый способ реализации дифференциального режима ИФРНС, отличающийся тем, что для передачи поправки к скорости распространения поверхностной волны от дифференциальной станции на передающую станцию и синхронизации ДС по шкале времени хранителя передающей станции используется канал метеорной связи [8].

Передача поправок и синхронизация по каналу метеорной связи позволяют применить дифференциальный режим ИФРНС для повышения точности передачи времени. При реализации встречного метода синхронизации по каналу метеорной радиосвязи погрешность (СКО) синхронизации может быть достигнута на уровне десятков наносекунд [8]. Потребителю рассчитанные на основе данных ДС усредненные поправки скорости распространения передаются в составе сигнала ИФРНС с помощью соответствующей модуляции импульсов навигационного сигнала. Предлагается передавать потребителю поправки к скорости распространения поверхностной волны в составе сигнала ИФРНС, рассчитанные на основе полученных от ДС по метеорной связи данных калибровки задержек ДВ сигнала с помощью метеорной синхронизации, что позволяет снизить погрешность передачи времени до десятков наносекунд без ГНСС.

Синхронизация ДС выполняется по метеорному радиоканалу (МРК). Схема измерений и передачи данных при калибровке по метеорному каналу приведена на рис. 4.

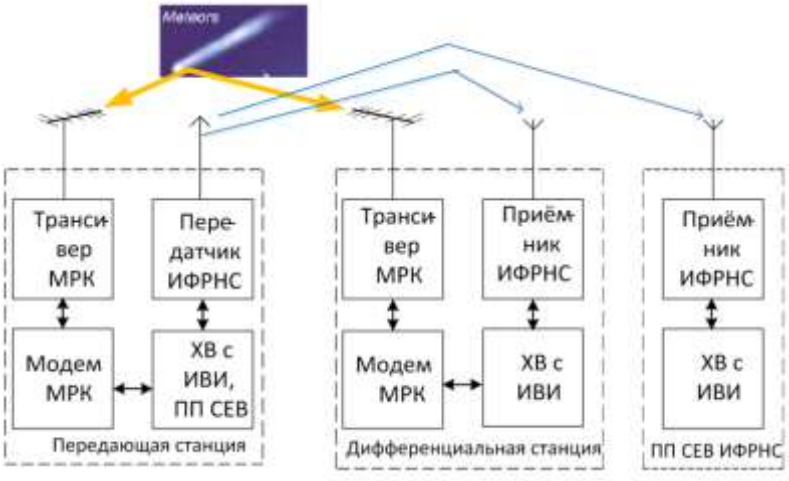


Рис.4. Калибровка скорости распространения сигнала ИФРНС с помощью метеорного радиоканала

Измеритель временных интервалов (ИВИ) определяет интервал времени Δt между метками времени от аппаратуры метеорной связи и синхронизации и приемника ИФРНС, и на основании этих данных на передающей станции вычисляется поправка к скорости распространения. Координаты ДС должны быть известны с метровой точностью с расчетом расстояния до передающей станции по дуге большого круга.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ ЧЕРЕЗ СДВ РАДИОСТАНЦИИ ДАЛЬНЕЙ СВЯЗИ

СДВ диапазон с частотами 3–30 кГц сейчас активно используется во многих странах мира для глобальной радиосвязи, в том числе с объектами под водой. Он также может использоваться для целей навигации. В России находится в эксплуатации РНС «Маршрут-Д».

В США до 90-х годов 20 века использовалась РНС «Омега». С 2015 года Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (*Defense Advanced Research Projects Agency*, DARPA) начало разрабатывать новую систему СДВ диапазона. на основе береговых станций связи с подводными лодками для реализации программы *Positioning. Navigation and Timing* (PNT) [9]. Работа должна была завершиться в 2019 году принятием системы на снабжение ВС США.

Для оценки состояния вопроса использования СДВ диапазона были проведены исследования по наблюдению сигналов в этом диапазоне. Была собрана экспериментальная установка в составе активной Е-антенны со штырем 1,5 м, малошумящего усилителя (МШУ) с LC полосовым фильтром Баттерворта 7-го порядка с усилением 46 дБ и персонального компьютера. В составе системной платы использовался 24-битным АЦП в кодеке аудио интерфейса.

На рис. 5 представлено полученное с помощью компьютерной программы Spectrum Lab изображение спектра части СДВ диапазона, свидетельствующее о постоянном и широком использовании частот диапазона военно-морскими силами зарубежных стран.

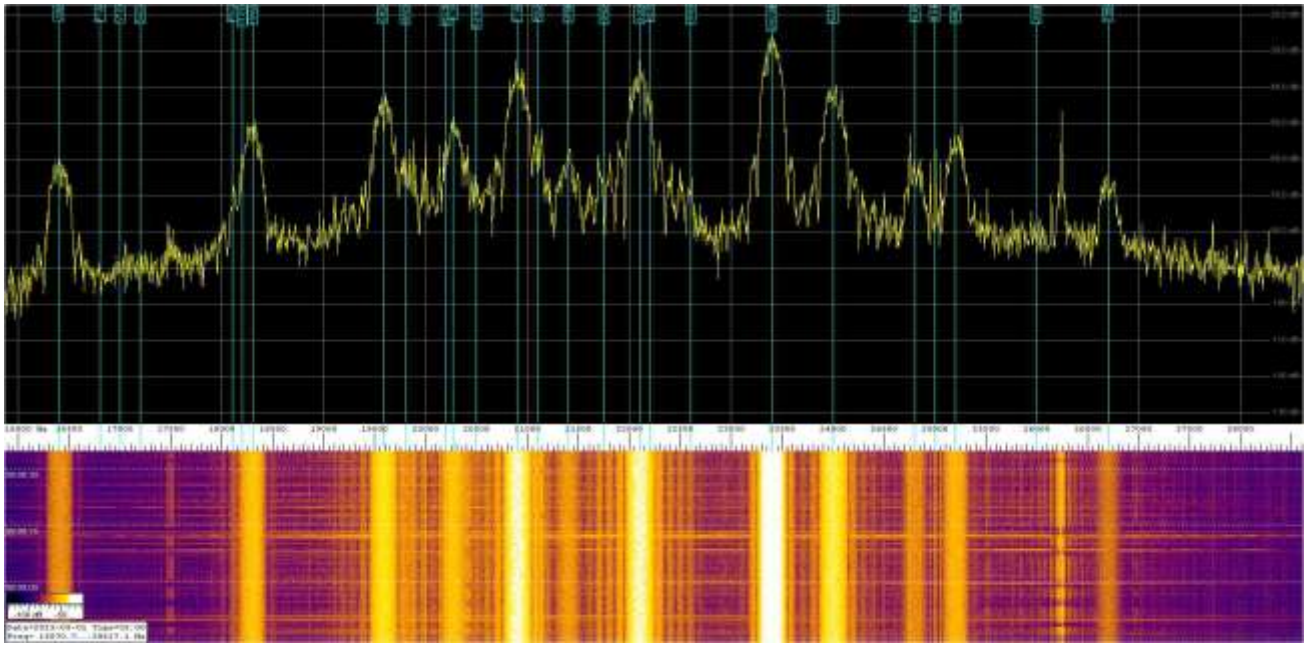


Рис. 5. Спектр участка СДВ диапазона 16–28,5 кГц с сигналами СДВ станций

СДВ сигнал принимается под водой и в затененных местах, и его сложно подавить на большой площади.

При создании СЕВ-ВТ для передачи времени были использованы СДВ радиостанции дальней связи. Существующие форматы сигналов сеансов передачи времени СДВ радиостанциями дальней связи определены в [4].

Сеанс передачи сигналов времени длится 36–47 минут (рис. 6), в течение которых объект должен двигаться прямолинейно и равномерно. Необходимо сокращение длительности сеанса и увеличение количества сеансов в сутки.

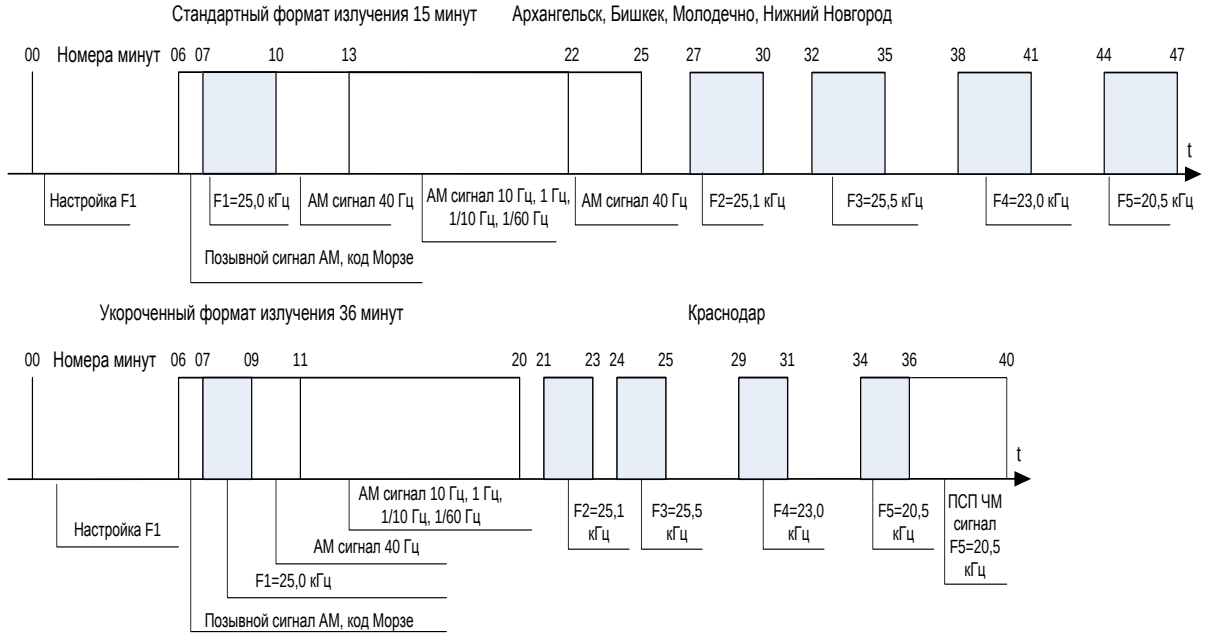


Рис. 6. Используемые в настоящее время форматы сеанса [4]

В настоящее время сеансы передаются станциями 1-2 раза в сутки (рис. 7). В составе сигнала передачи времени СДВ системы связи не передается необходимая пользователям информация. Требуется передавать информацию о поправке для определения Всемирного времени, оцифровке шкалы времени и дате.

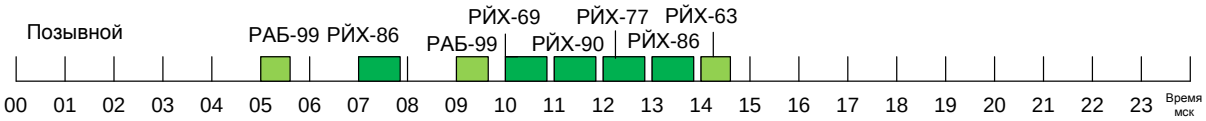


Рис. 7. Суточная последовательность передачи времени через станции дальней связи [4]

Первоначальная длительность сеанса 47 минут была при модернизации СЕВ сокращена до 36 минут. Предложено сократить ее до 15 минут путем использования бинарной фазовой манипуляции при передаче позывного станции и НЧ программы и сокращения до четырех количества гармонических компонент ВЧ программы [9, 10]. После передачи кода позывного три минуты передается обновленный формат НЧ программы, в которой для передачи метки ШВ «1 минута» используется 60-элементная псевдослучайная последовательность (ПСП) [9]. Минутный цикл НЧ программы нового формата представлен на рис. 8. Предложенный сеанс формата передачи времени длительностью 15 минут показан на рис. 9.

Количество высокочастотных компонент в сеансе излучения СДВ сигналов времени обусловлено погрешностью грубого измерения временного положения фронта АМ сигнала и значениями коэффициентов перехода при разрешении многозначности фазовых измерений.

В настоящее время разрешение многозначности (РМ) фазовых измерений проводится на разностных частотах 100 Гц, 500 Гц, 2500 Гц, 5000 Гц с переходом на первую высокочастотную компоненту 25000 Гц. При этом коэффициенты перехода составляют 5-5-2-5 соответственно. Выбор значений частот высокочастотных компонент был обусловлен тем, что при большой продолжительности сеанса для надежного разрешения многозначности коэффициент перехода не должен превышать 5.

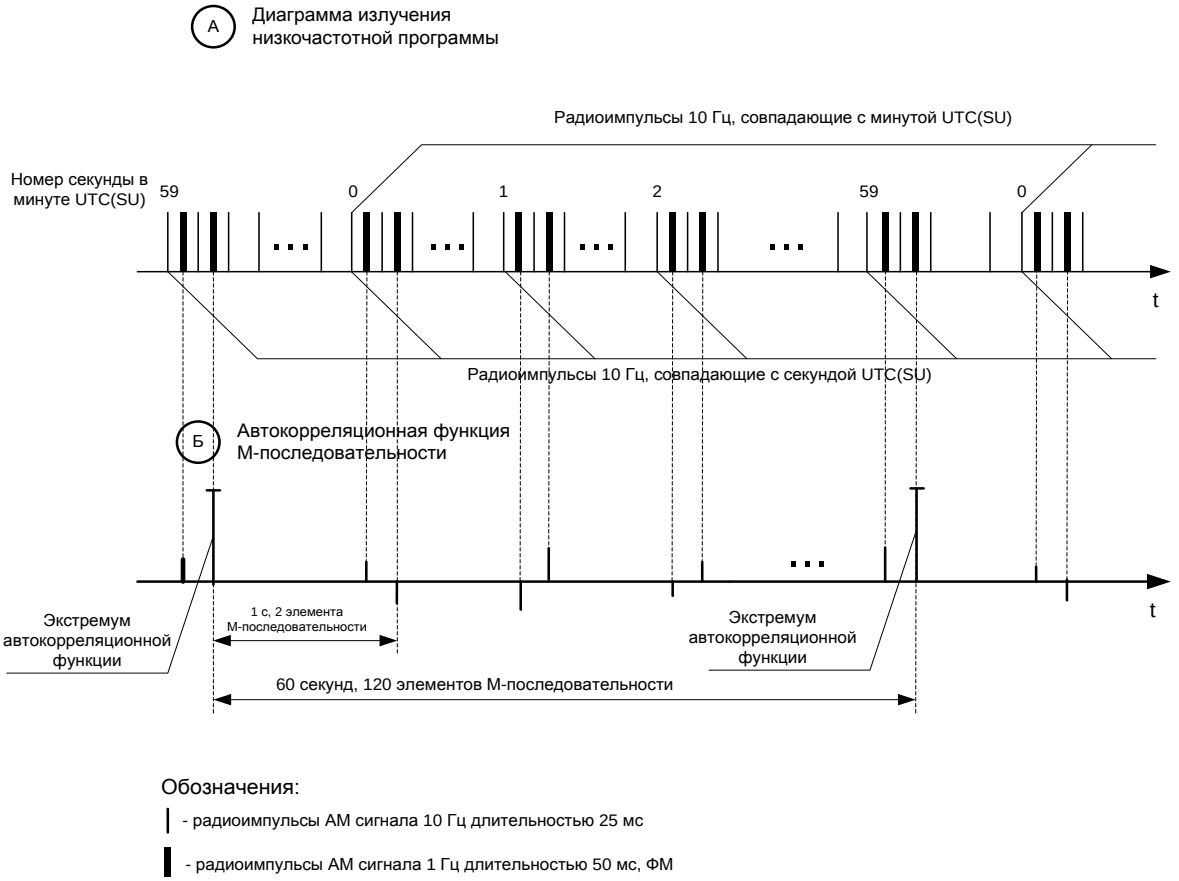


Рис. 8. Минутный цикл НЧ программы нового 15-минутного формата



Рис. 9. Предложенный сеанс формата передачи времени длительностью 15 минут

При использовании низшей разностной частоты 100 Гц разрешение многозначности фазовых измерений производится до интервала 10 мс. Очевидно, что для получения значения полного рассогласования ШВ ПП СЕВ относительно шкалы UTC(SU) погрешность грубого измерения по НЧ программе не должна превышать 5 мс. Однако при реализации программно-цифровой обработки сигналов погрешность грубого измерения не превышает 1 мс. Случайная погрешность (СКО) не превышает 80 мкс. Систематическая погрешность, составляющая 300–500 мкс при приеме сигналов от различных передающих станций, связана с различными точностями синхронизации фронта НЧ сигнала на станциях. При применении современных устройств формирования сигналов сеанса эта систематическая погрешность может быть уменьшена до значений 50–80 мкс. Таким образом, общая погрешность грубой

привязки по АМ сигналам может быть сведена к значениям, не превышающим 100–200 мкс. При такой точности грубой привязки появляется возможность повышения значения первой разностной частоты, применяемой при РМ, до 500 Гц с разрешением многозначности по ВЧ программе до интервала 2 мс. При этом достаточно излучать только четыре ВЧ компоненты (F1 = 25 кГц, F2 = 25,5 кГц, F3 = 23 кГц и F4 = 20,5 кГц).

При разрешении многозначности фазовых измерений до интервала 2 мс в приемнике используются следующие фазы разностных частот и коэффициенты переходов:

$$\varphi_{500} = \varphi_2 - \varphi_1;\ \varphi_{2500} = \varphi_2 - \varphi_3;\ \varphi_{5000} = \varphi_2 - \varphi_4;$$

$$\Phi_{2500} = k_{2500} \cdot \varphi_{500};\ (k_{2500} = 5);$$

$$\Phi_{5000} = k_{5000} \cdot \Phi_{2500};\ (k_{5000} = 2);$$

$$\Phi_{25000} = k_{25000} \cdot \Phi_{5000};\ (k_{25000} = 5).$$

Для снижения коэффициента перехода многозначность может быть разрешена на более низкой частоте:

$$\Phi_{20500} = k_{20500} \cdot \Phi_{5000}; \quad k_{20500} = 4{,}1$$

Дальнейшее сокращение времени сеанса связано с уменьшением времени излучения высокочастотных компонент сеанса передачи. При использовании цифровой обработки сигнала время, достаточное для усреднения, не превышает 50 секунд. Таким образом, существует возможность сокращения времени передачи каждой высокочастотной компоненты до одной минуты.

Для передачи метки времени «1 минута» был выбран участок длинной М-последовательности с минимальными боковыми лепестками АКФ (не более 13%) длиной 60 элементов. Для выбора использовался поиск со сдвигом по коду длиной ПСП. Значения найденного при этом и использованного для передачи минутной метки фрагмента последовательности (*hex*) представлены в табл. 3, АКФ представлена на рис. 10.

Таблица 3

Полученная ПСП в шестнадцатеричной форме

7	1	C	D	6	8	9	0	C	0	F	5	1	1	B

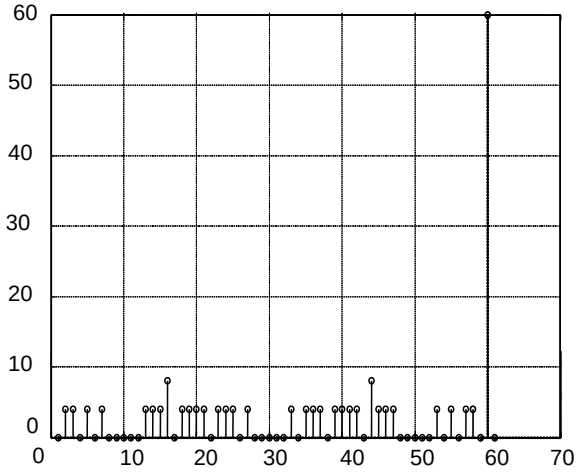


Рис. 10. ПСП минутного маркера нового формата

По результатам математического моделирования подтверждена возможность достоверного приема предложенного формата СДВ сигналов с использованием кодирования ПСП низкочастотной части программы излучения при сокращении времени излучения низкочастот-

ной части программы до 3–4 минут. Для сохранения совместимости с аппаратурой предыдущих поколений сеансы передачи времени в новом формате предлагается передавать совместно с сеансами существующего формата вторыми сеансами (рис. 11).

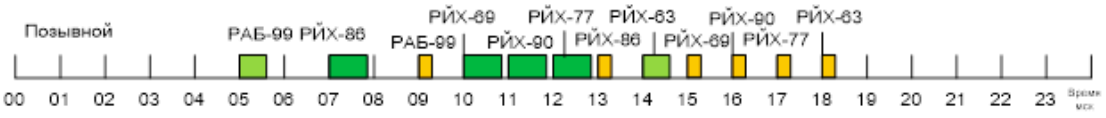


Рис. 11. Предлагаемая суточная последовательность передачи сигналов времени СДВ радиостанциями дальней связи

В итоге при модернизации формата в аппаратно-программных средствах предложено [9, 10] и реализовано:

– уменьшение длительности пауз на перестройку передатчика до 1–2 минут;

– уменьшение времени излучения низкочастотной части сеанса до 5 минут с исключением сигнала 40 Гц;

– уменьшение количества высокочастотных компонент сеанса до четырех;

– уменьшение времени передачи высокочастотных компонент до 2 минут.

Для импульсных измерений используются сигналы 10 Гц, 1 Гц, для передачи метки времени «1 минута» предложено использовать фазовую манипуляцию (0°/180°) АМ сигнала 1 Гц 60-элементной псевдослучайной укороченной М-последовательностью, максимум автокорреляционной функции которой предшествует фронту АМ сигнала 1 Гц, соответствующему минуте шкалы UTC(SU). Время, достаточное для обнаружения АМ сигнала 1 Гц и декодирования его фазовой манипуляции, составляет не более 2–4 минут.

Оцифровка шкалы времени потребителя обеспечивается с помощью передачи номера минуты в часе в сеансе передачи.

Реализация данных предложений не устраняет основной причины низкой помехоустойчивости сигналов передачи времени СДВ диапазона – использования АМ и многошкального метода с фазовыми измерениями гармонических (синусоидальных) сигналов на нескольких частотах. В [10] предложено дальнейшее развитие методов передачи времени с помощью радиостанций дальней связи СДВ диапазона. Предлагается передавать на одной частоте, например на основной частоте связи, широкополосный (с шириной полосы 250–300 Гц) ФМ сигнал, модулированный ПСП аналогично структуре навигационного сигнала ГНСС. Метки времени передаются в этом формате максимумами АКФ ПСП с переходом на измерение фазы несущей после разрешения многозначности по коду. Для передачи данных используется алфавит (набор символов), состоящий из ПСП с минимальной взаимной корреляцией из кодов Касами, Голда или других подобных. В [10] показано, что при этом возможно сокращение времени сеанса привязки до 5–8 минут в зависимости от выбранной рабочей частоты канала связи с одновременным существенным повышением устойчивости к сосредоточенным по спектру или времени помехам.

Простейший пример реализации кода Голда, состоящего из 127 элементов: скорость передачи кода 25,4 бита в секунду, длительность цикла кода 5 секунд, скорость канала передачи данных 1–1,5 бита в секунду. При использовании более сложных сигнально-кодовых конструкций возможно кодовое разделение сигналов станций, непрерывно работающих на одной частоте (аналогично GPS и ГЛОНАСС-К), и селективный доступ к сигналам системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определено понятие «передача времени» как совокупность действий по измерению и сведению к допустимому уровню разности шкал времени (ШВ) объектов, разнесенных в про-

странстве. Технология передачи времени через радиостанции состоит в совокупности методов и средств по излучению, контролю и приему и обработке сигналов времени и частотно-временной информации (оцифровки ШВ и поправки для уточнения UT1) с целью привязки локальных ШВ к единой шкале времени.

Разработаны пути повышения оперативности, помехоустойчивости и информативности передачи времени через передающие станции ИФРНС на основе использования бинарной фазовой манипуляции, что позволяет уменьшить время поиска маркеров совпадений в несколько раз и передать информацию о номере часа в сутках, минуты в часе и поправке для определения Всемирного времени.

Разработаны пути повышения оперативности, помехоустойчивости и информативности передачи времени через СДВ радиостанции дальней связи на основе использования программно-аппаратной обработки сигнала и использования бинарной фазовой манипуляции, что позволило сократить время сеанса передачи времени до 15 минут и передать информацию о времени суток и поправке для определения Всемирного времени.

Предложен способ калибровки скорости распространения поверхностного сигнала в ДВ радиоканале дальней навигации с помощью метеорной синхронизации, что позволяет снизить систематическую погрешность передачи времени по этому каналу локально до десятков наносекунд.

Список использованных источников

1. *Тюляков А. Е., Белов Л. Я., Паршин П. Н.* Государственная система единого времени и эталонных частот «Цель» в части объектов и средств Министерства обороны Российской Федерации: состояние и перспективы развития // Труды ИПА РАН. – 2018. – Вып. 44. – С. 126–132.

2. Радиотехническая система единого времени : учеб. пособие / И. И. Акулов [и др.]. – МО СССР, 1971. – 184 с.

3. Перспективы совершенствования Государственной системы единого времени и эталонных частот. Цель на период 2016–2020 гг. / Л. Я. Белов [и др.] // Труды ИПА РАН. – 2013. – Вып. 27. – С. 90–95.

4. Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные и космические средства навигации, глобальную сеть Интернет : бюллетень В 17/2020. – М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 2020. – 32 с.

5. Состояние и перспективы развития передачи и приема сигналов времени по ДВ радиостанциям ИФРНС РФ / Б. Ф. Бабайкин [и др.] // Третья Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2009)» : сб. тезисов. – СПб. : ИПА РАН, 2009. – С. 217–218.

6. *Быков В. И., Никитенко Ю. И.* Судовые радионавигационные устройства. – М. : Транспорт, 1976. – 399 с.

7. *Басс В. И., Зарубин С. П., Быковский С. В.* Облик перспективной длинноволновой импульсно-фазовой радионавигационной системы // Радионавигация и время : труды СЗРЦ концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2022. – № 9(17)-2022. – С. 24–38.

8. *Жуков Е. Т., Коваль Ю. А., Дудник Б. С.* Метеорная синхронизация шкал времени : учеб. пособие / под ред. Б. И. Макаренко. – МО СССР, 1989. – 144 с.

9. Состояние и пути модернизации отечественных средств передачи времени на сверхдлинных волнах / Б. Ф. Бабайкин [и др.] // Труды ИПА РАН. – 2018. – Вып. 44. – С. 3–9.

10. Передача времени на сверхдлинных волнах с помощью кодовой манипуляции фазы несущей / Е. Т. Жуков [и др.] // Труды ИПА РАН. – 2020. – Вып. 55. – С. 4–9.

И. С. Бердюгин[1];
А. В. Косырев[2]
[1, 2] Военная академия связи
имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого,
г. Санкт-Петербург.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В статье рассмотрен процесс изменения технического состояния средств связи. Целью работы является определение нахождения техники связи в различных состояниях. Математическая модель описывает на качественном уровне принципы построения и функционирования элементов подсистем управления, снабжения и восстановления, их основные элементы и взаимосвязи между ними, процессы, протекающие в них. Предложены пути дальнейшего развитии методов моделирования систем технического обеспечения.

Ключевые слова: техническое обеспечение, аналитическая модель, система дифференциальных уравнений, состояние средств связи.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт последних лет привел к закреплению в военной науке тезисов о снижении применения в военных конфликтах мобильных группировок войск. Между тем, в настоящее время боевые действия приходится вести с полноценными межвидовыми группировками войск и сил специальных операций противника, обладающими многолетним опытом ведения боев, системно подготовленными и использующими современные вооружение, средства связи, разведки и радиоэлектронной борьбы, имеющими соответствующую идеологию [4, 6].

Для решения задач технического обеспечения в соединениях и воинских частях выполняются: обеспечение техникой (имуществом) связи и автоматизированными системами управления (АСУ), ввод в эксплуатацию техники связи, техническое обслуживание, техническая разведка, эвакуация, ремонт техники связи, мониторинг технического состояния, техническая подготовка личного состава [7, 9].

Выполнение задач технического обеспечения в настоящее время характеризуется не в полной мере достаточным уровнем производственных возможностей ремонтных органов из-за недостатка специалистов и дефицита ремонтных комплектов, а также повышенным расходом отдельных номенклатур техники связи. К тому же система технического обеспечения функционирует в условиях постоянного изменения форм и способов применения войск.

В условиях современных вооруженных конфликтов в первую очередь выполняются мероприятия, в наибольшей степени определяющие боевую готовность и боеспособность воинских частей и соответствующие цели технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ): обеспечение, техническая разведка, эвакуация, ремонт. Увеличение времени выполнения вышеуказанных мероприятий приводит к преобладанию потоков отказов над интенсивностями восстановления, увеличению доли техники связи, пребывающей в нерабочем состоянии, и, в конечном итоге, к невыполнению требований по уровню обеспеченности работоспособной техникой связи и АСУ [7, 8].

Восстановление является основным источником восполнения потерь средств связи и представляет собой совокупность процессов, протекающих в подсистемах управления, снабжения и восстановления соответственно [1].

Требуется провести детальное исследование процесса изменения состояний техники связи с помощью аналитического моделирования, поскольку оно позволяет получить необходимые

функциональные зависимости между исходными и выходными данными, что имеет значение для качественного изучения процесса функционирования системы технического обеспечения. С помощью разработанной аналитической модели можно рассчитать вероятности нахождения средств связи в различных состояниях.

Ключевой итог моделирования – установление взаимосвязи между потоками отказов, интенсивностью восстановления и вероятностью нахождения техники связи в различных состояниях. Это позволит не только обеспечить правильное отражение процессов выхода техники связи из строя и ее восстановления, но и количественно оценить возможности системы ТОС и АСУ по достижению главной цели своего функционирования.

Построение модели включает в себя:

– расчет количественных характеристик состояний техники связи;

– определение деструктивных воздействий;

– формулировку аналитических соотношений для расчета состояний техники связи.

Результаты работы позволят исследовать проблемные вопросы традиционных способов построения системы ТОС и АСУ и предложить пути их решения, а в перспективе будут способствовать решению задачи поддержки принятия решений должностным лицам при формировании оптимальной структуры системы ТОС и АСУ в прогнозируемых условиях современных операций, а также в процессе оперативного управления техническим обеспечением.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для построения модели состояний техники связи применяются исходные данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для разработки модели

№ п/п	Наименование	Обозначение
Множество состояний системы технического обеспечения (*S*)		
1	Принятая структура системы технического обеспечения	$S = [s1,s2\ldots si]$
Параметры функционирования системы технического обеспечения (*X*)		
2	Количество специалистов-ремонтников	*A*
3	Продолжительность выполнения задач	*T*
4	Продолжительность ремонта средств связи	*T*рем
5	Время работы специалистов-ремонтников	*t*рем
6	Коэффициент повышения сроков ремонта вследствие повреждений средств связи	*K*бп
7	Коэффициент, учитывающий обученность личного состава	*K*экспл
Воздействие противника (*Y*)		
8	Прогнозируемый выход техники связи в различные виды ремонта	*N*п*(t)*
9	Коэффициент выхода из строя средств ремонта	*K*ср
10	Коэффициент, учитывающий воздействие противника	*K*ср
11	Коэффициент, учитывающий оперативное построение	*K*оп
Ограничения по ресурсам (*R*)		
12	Коэффициент доступности сил и средств технического обеспечения	*C*дост
13	Количество средств технического обеспечения	*N*тос
14	Коэффициент доли запасов средств связи	*K*зап
15	Количество доли техники двойного назначения	*N*тдн
16	Количество доли трофейной техники	*N*тр

На основе указанных исходных данных вероятностная модель изменения состояния техники связи в системе технического обеспечения определяет соответствующие выходные данные – вероятность нахождения техники связи в работоспособном состоянии.

При разработке модели приняты следующие ограничения и допущения:

– воздействие противника (ресурс и стратегия) считается известным;

– моделируется выход техники связи из строя в текущий, средний, капитальный ремонт с учетом ремонта по техническому состоянию;

– деградационные и эксплуатационные отказы объединены в группы надежностных отказов.

В качестве математического аппарата при моделировании применяются дифференциальные уравнения Колмогорова, теория графов, марковские случайные процессы.

В качестве основного математического аппарата в работе выбраны марковские процессы ввиду того, что они качественно описывают стохастическую природу отказов и восстановлений (что подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями), адекватны реальным системам, позволяют получать объективные оценки показателей надежности.

Простейший марковский процесс характеризуется тремя основными свойствами [3]. К ним относятся:

1) стационарность – вероятность появления определенного количества событий на любом интервале зависит только от длины этого интервала и не зависит от его расположения на временной оси, т. е. интенсивность потока постоянна;

2) отсутствие последействия – для любых двух непересекающихся интервалов времени число событий, наступающих на одном из них, не зависит от числа событий, наступающих на другом;

3) ординарность – вероятность появления на малом интервале времени двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления ровно одного события, т. е. два события не могут произойти абсолютно одновременно на очень коротком промежутке времени.

Таким образом, применение марковских процессов для описания смены состояний техники связи является научно обоснованным, практически целесообразным и экономически эффективным подходом, обеспечивающим глубокое понимание динамики технического состояния системы связи и позволяющим принимать обоснованные управленческие решения.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Разрабатываемая модель предназначена для расчета нахождения техники связи в работоспособном состоянии $Ps0(t)$ в зависимости от параметров функционирования, влияния состояния системы, а также воздействия противника и имеющихся резервов:

$$Psi(t): \langle S, X, Y, R\rangle \rightarrow Ps0(t) \mid X \subseteq X_{\text{доп}}, Y \subseteq Y_{\text{доп}}, R \subseteq R_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где S – множество состояний системы (изменяющихся структур объекта исследования);

X – параметры функционирования системы;

Y – факторы внешнего воздействия;

R – имеющиеся резервы, а также топология системы.

Цель моделирования заключается в исследовании влияния параметров X, Y, R и состояния наблюдаемого объекта S на вероятности состояний техники связи $Psi(t)$, которые, в свою очередь, влияют на эффективность функционирования системы ТОС и АСУ, что выражается через уровень обеспеченности работоспособной техникой связи $Q_{\text{тос}}$.

В соответствии с [2] отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Для техники связи наиболее характерными видами отказов, наряду с боевыми повреждениями, будут являться:

а) эксплуатационный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта;

б) деградационный отказ – отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных норм проектирования, изготовления и эксплуатации объекта.

В настоящее время удалось значительно снизить количество эксплуатационных отказов за счет более качественного подбора и обучения личного состава, эксплуатирующего средства связи. Полученная статистика, а также опыт научных исследований [5] позволяют определить величину потока эксплуатационных отказов: $\lambda_{экспл} = 0{,}03$ 1/ч.

Деградационные отказы учитываются в зависимости от наработки техники связи, определенной в технической документации, при расчетах принимаются равными $\varepsilon = 0{,}002$ 1/ч.

Основным источником восполнения потерь техники связи и АСУ в вооруженных конфликтах является восстановление. Восстановление включает в себя техническую разведку, эвакуацию, ремонт, возвращение техники связи в строй. Основным этапом процесса восстановления ТС и АСУ является ремонт, представляющий собой комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению исправного или работоспособного состояния объекта и по восстановлению ресурса объекта или его составных частей [2].

Основной задачей ремонта ТС и АСУ, получивших повреждения, является восстановление их работоспособности в возможно короткие сроки [6], выполняемое силами и средствами подсистем снабжения и восстановления.

Для обеспечения восполнения вышедшей из строя техники создаются запасы, размещаемые на складах средств связи и складах военно-технического имущества. Ремонт выполняется силами личного состава, за которым закреплена техника связи, специалистами войсковых ремонтных органов, передовых пунктов технического обслуживания и выездных ремонтных бригад предприятий промышленности.

На качество и оперативность ремонта влияет квалификационный уровень специалистов-ремонтников (табл. 2).

Таблица 2

Квалификационные уровни подготовки специалистов-ремонтников

Начальная сложность, А		Скорость обучения, В		Граничные значения	Квалификация	Сложность работы
Низкая	$A \le 3$	Низкая	$0{,}08 \le B$	<1,5	Высокая	Низкая
		Средняя	$0{,}046 \le B \le 0{,}079$			
		Высокая	$B \le 0{,}045$			
Средняя	$3{,}01 \le A \le 7{,}60$	Низкая	$0{,}08 \le B$	1,51–3,8	Средняя	Средняя
		Средняя	$0{,}046 \le B \le 0{,}079$			
		Высокая	$B \le 0{,}045$			
Высокая	$7{,}61 \le A$	Высокая	$B \le 0{,}045$	>3,81	Низкая	Высокая
		Средняя	$0{,}046 \le B \le 0{,}079$			
		Низкая	$0{,}08 \le B$			

В ходе принятия решения на организацию технического обеспечения должностные лица определяют порядок построения системы, сеть органов снабжения и ремонта, их задачи, структуру, виды производимого ремонта и порядок его организации, а также прогнозируют потери в средствах связи.

Производительность системы ТОС и АСУ определяется выражением

$$W_{\text{ро}} = \frac{t_{\text{рем}} \cdot A \cdot T \cdot K_{\text{бп}} \cdot K_{\text{ср}}}{T_{\text{рем}} \cdot K_{\text{зап}}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{рем}}$ – время работы специалистов-ремонтников;
A – количество специалистов-ремонтников;
T – продолжительность выполнения задач;
$K_{\text{бп}}$ – коэффициент повышения сроков ремонта вследствие повреждений средств связи;
$T_{\text{рем}}$ – продолжительность ремонта средств связи;
$K_{\text{ср}}$ – коэффициент выходов из строя средств ремонта;
$K_{\text{зап}}$ – коэффициент доли запасов средств связи.

Полученные данные по производительности ремонтных органов дадут возможность рассчитать обеспеченность в работоспособных средствах связи:

$$Q_{\text{р}}(t) = \frac{N_{\text{р}}(t_{\text{з}})}{N_{\text{р}}(0)}, \quad (3)$$

где $N_{\text{р}}(t_{\text{з}})$ – количество работоспособной техники к моменту завершения выполнения задач;
$N_{\text{р}}(0)$ – количество работоспособной техники на момент подготовки и планирования.

Задачи, решаемые подсистемами восстановления и снабжения под воздействием системы управления, являются взаимоувязанными, в целом направлены на обеспечение функционирования системы связи для эффективного выполнения поставленных задач и определяют процесс восстановления ТС и АСУ. Данные задачи представляют процессы, происходящие в системе массового обслуживания, где потери в ТС и АСУ являются потоками отказов (требования на обслуживание), а ремонт средств связи описывает интенсивность восстановления.

Фундаментальной характеристикой задач теории массового обслуживания является стохастическая природа изучаемых процессов, поскольку число заявок, интервалы между их поступлением и время обслуживания носят вероятностный характер. Данное обстоятельство обуславливает применение аппарата случайных процессов, в особенности марковских, для математического описания систем массового обслуживания.

Рассматриваемая система представляет собой многоканальную систему массового обслуживания типа *M*/*M*/*m* с неограниченной очередью, где входящий поток заявок имеет пуассоновское распределение, а время обслуживания – экспоненциальное распределение

На рис. 1 представлена диаграмма интенсивности переходов для системы *M*/*M*/*m*/∞. В каждом из состояний существует возможность перехода в три возможных состояния: поступление нового требования, убытие обслуженного требования и отсутствие указанных событий (система остается в прежнем состоянии).

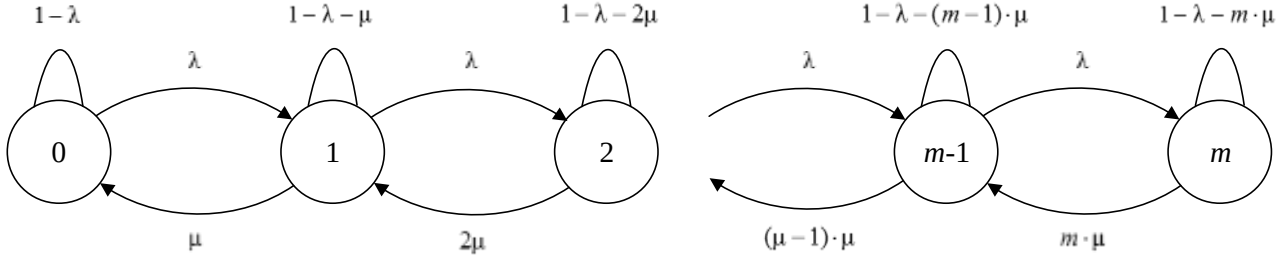


Рис. 1. Диаграмма интенсивностей переходов для системы M/M/m/∞

Поскольку очередь является неограниченной, количество требований, находящихся в ней, может быть значительным.

Описание вероятностных состояний средств связи осуществляется с использованием марковских процессов с дискретным пространством состояний и непрерывным временным параметром. В процессе функционирования средства связи могут находиться в некотором множестве состояний *Si*(*t*), которые можно отнести к области работоспособных или неработоспособных.

Определим перечень возможных состояний техники связи в системе ТОС и АСУ:

S_0 – работоспособное состояние (эксплуатация);

S_1 – нерабочее состояние (техническая разведка);

S_2 – неработоспособное состояние (деградационный отказ);

S_3 – неработоспособное состояние (эксплуатационный отказ);

S_4 – неработоспособное состояние (ремонт по техническому состоянию, простой);

S_5 – неработоспособное состояние (доставка в ремонт);

S_6 – неработоспособное состояние (ремонт по техническому состоянию, сложный);

S_7 – неработоспособное состояние (ремонт по техническому состоянию, на передовом пункте технического обеспечения с применением резерва средств связи);

S_8 – неработоспособное состояние (разбраковка, передача в ремонтный фонд);

S_9 – работоспособное состояние (обеспечение).

Функционирование средств связи характеризуется стохастическими переходами между состояниями, инициируемыми случайными событиями. Анализируемый граф имеет вид, представленный на рис. 2.

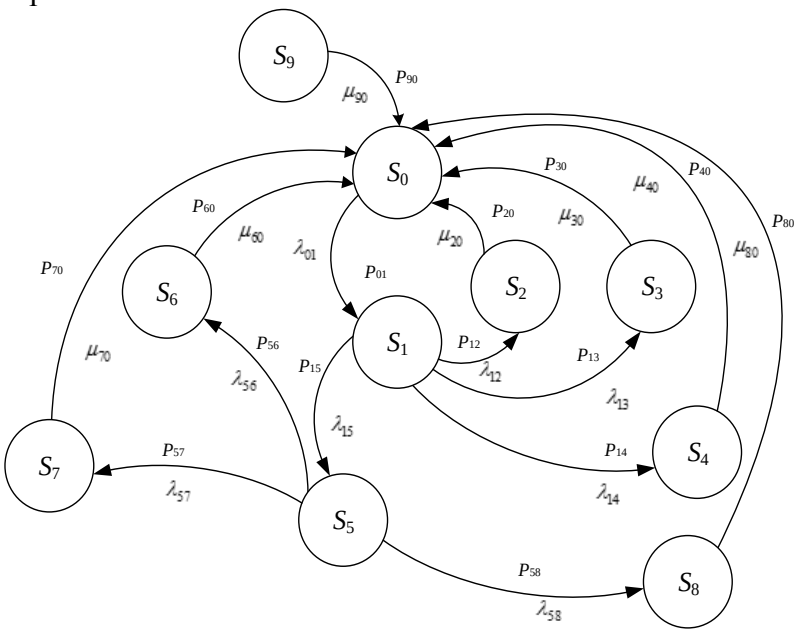


Рис. 2. Анализируемый граф состояний техники связи

Структура переходов между состояниями техники связи, представленная в виде графа, служит основой для формирования системы дифференциальных уравнений Колмогорова с целью определения вероятности *Ps*0(*t*).

Общий вид уравнения для вероятности $P_{si}(t)$ нахождения в состоянии *Si* имеет вид

$$\frac{dP_{si}}{dt} = \sum(\lambda_{ji}P_j - \lambda_{ij}P_i) + \mu_{i0}P_0 - \mu_{0i}P_i. \quad (4)$$

Условие стационарности режима и простейшей природы потоков событий (обнуление производных) позволяет преобразовать систему дифференциальных уравнений в систему алгебраических:

$$\begin{cases} -\lambda_{01}P_0(t)+\mu_{20}P_2(t)+\mu_{30}P_3(t)+\mu_{40}P_4(t)+\mu_{60}P_6(t)+\mu_{70}P_7(t)+\mu_{80}P_8(t)+\mu_{90}P_9(t)=0 \\ -(\lambda_{12}+\lambda_{13}+\lambda_{14}+\lambda_{15})P_1(t)+\lambda_{01}P_0(t)=0 \\ -\mu_{20}P_2(t)+\lambda_{12}P_1(t)=0 \Rightarrow P_2=\dfrac{\lambda_{12}}{\mu_{20}}P_1 \\ -\mu_{30}P_3(t)+\lambda_{13}P_1(t)=0 \Rightarrow P_3=\dfrac{\lambda_{13}}{\mu_{30}}P_1 \\ -\mu_{40}P_4(t)+\lambda_{14}P_1(t)=0 \Rightarrow P_4=\dfrac{\lambda_{14}}{\mu_{40}}P_1 \\ -(\lambda_{58}+\lambda_{57}+\lambda_{56})P_5(t)+\lambda_{15}P_1(t)=0 \Rightarrow P_5=\dfrac{\lambda_{15}}{(\lambda_{56}+\lambda_{57}+\lambda_{58})}P_1 \\ -\mu_{60}P_6(t)+\lambda_{56}P_5(t)=0 \Rightarrow P_6=\dfrac{\lambda_{56}}{\mu_{60}}P_5 \\ -\mu_{70}P_7(t)+\lambda_{57}P_5(t)=0 \Rightarrow P_7=\dfrac{\lambda_{57}}{\mu_{70}}P_5 \\ -\lambda_{58}P_5(t) \Rightarrow P_8=0 \Rightarrow P_8=\dfrac{\lambda_{58}}{\mu_{80}}P_5 \\ -\mu_{90}P_9(t)=0 \Rightarrow P_9=0 \end{cases} . \quad (5)$$

Вероятность $Ps0(t)$ не рассчитывается через отдельное выражение, так как она уже содержится в условии нормировки и будет дублировать информацию из других уравнений. Это стандартный подход в теории марковских процессов, обеспечивающий математическую согласованность и физическую осмысленность. После преобразования всех вероятностей через $Ps0$ итоговые выражения примут вид:

$$\begin{cases} P_1=\dfrac{\lambda_{01}}{\Lambda}P_0, \Lambda=\lambda_{12}+\lambda_{13}+\lambda_{14}+\lambda_{15} \\ P_2=\dfrac{\lambda_{12}\cdot\lambda_{01}}{\mu_{20}\cdot\Lambda}P_0 \\ P_3=\dfrac{\lambda_{13}\cdot\lambda_{01}}{\mu_{30}\cdot\Lambda}P_0 \\ P_4=\dfrac{\lambda_{14}\cdot\lambda_{01}}{\mu_{40}\cdot\Lambda}P_0 \\ P_5=\dfrac{\lambda_{15}\cdot\lambda_{01}}{(\lambda_{56}+\lambda_{57}+\lambda_{58})\cdot\Lambda}P_0 \\ P_6=\dfrac{\lambda_{56}\cdot\lambda_{15}\cdot\lambda_{01}}{\mu_{60}\cdot(\lambda_{56}+\lambda_{57}+\lambda_{58})\cdot\Lambda}P_0 \\ P_7=\dfrac{\lambda_{57}\cdot\lambda_{15}\cdot\lambda_{01}}{\mu_{70}\cdot(\lambda_{56}+\lambda_{57}+\lambda_{58})\cdot\Lambda}P_0 \\ P_8=\dfrac{\lambda_{58}\cdot\lambda_{15}\cdot\lambda_{01}}{\mu_{80}\cdot(\lambda_{56}+\lambda_{57}+\lambda_{58})\cdot\Lambda}P_0 \end{cases} . \quad (6)$$

После соответствующих преобразований итоговое выражение для определения вероятности нахождения ТС и АСУ в работоспособном состоянии $Ps0(t)$ примет вид

$$P_0 = \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\sum_{j=2}^{5} \lambda_{1j}} \cdot \left(\frac{\sum_{j=2}^{4} \lambda_{1j}}{\sum_{j=2}^{4} \mu_{j0}} + \frac{\lambda_{15}}{\sum_{k=6}^{8} \lambda_{5k}} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_{56}}{\mu_{60}} + \frac{\lambda_{57}}{\mu_{70}} \right) \right)^{-1}, \quad (7)$$

где

$$\sum_{j=2}^{5} \lambda_{1j} = \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15}; \quad (8)$$

$$\sum_{k=6}^{8} \lambda_{5k} = \lambda_{56} + \lambda_{57} + \lambda_{58}; \quad (9)$$

$$\sum_{j=2}^{4} \mu_{j0} = \mu_{20} + \mu_{30} + \mu_{40}. \quad (10)$$

Расчет состояний техники связи осуществляется на основании имеющихся исходных данных (λ – потоки отказов, 1/ч), возможностей по ремонту (μ – интенсивности восстановления, 1/ч) и имеющихся резервов (табл. 3). Расчетные данные по потокам отказов и интенсивностям восстановления формируются в зависимости от принадлежности воинской части к звену управления и условиям выполнения задач, определяются на основании статистических данных и (или) методом экспертных оценок. На рис. 3–5 представлены результаты определения вероятности $Ps0(t)$ с учетом различных вариантов построения системы ТОС и АСУ.

Таблица 3

Расчет вероятности нахождения техники связи в работоспособном состоянии

Наименование	Результаты расчетов		
	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 5
λ12 (деградационный отказ)	ε = 0,002	ε = 0,002	ε = 0,002
λ13 (эксплуатационный отказ)	0,03	0,03	0,03
λ14 (ремонт по техническому состоянию, простой)	0,16	0,16	0,16
λ56 (ремонт по техническому состоянию, сложный)	0,23	0,23	0,23
λ57 (ремонт по техническому состоянию, на ППТО, резерв сил и средств)	0,49	0,49	0,49
λ58 (разбраковка, передача в ремонтный фонд)	0,70	0,70	0,70
μ20 – восстановление по *S*2 (деградационный отказ)	–	–	–
μ30 – восстановление по *S*3 (эксплуатационный отказ)	0,03	0,03	0,03
μ40 – восстановление по *S*4 (ремонт по ТС, простой)	0,3	0,3	0,3
μ60 – восстановление по *S*6 (ремонт по ТС, сложный)	0,25	0,25	0,25

Окончание табл. 3

Наименование	Результаты расчетов		
	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 5
μ70 – восстановление по *S*7 (ремонт по ТС, на ППТО, резерв сил и средств)	–	0,5	0,5
μ80 – восстановление по *S*8 (ремонтный фонд)	–	–	–
μ90 – восстановление обеспечением (ремонтный комплект)	–	–	0,7
Итоговое расчетное значение *Ps*0(*t*)	0,70	0,74	0,79

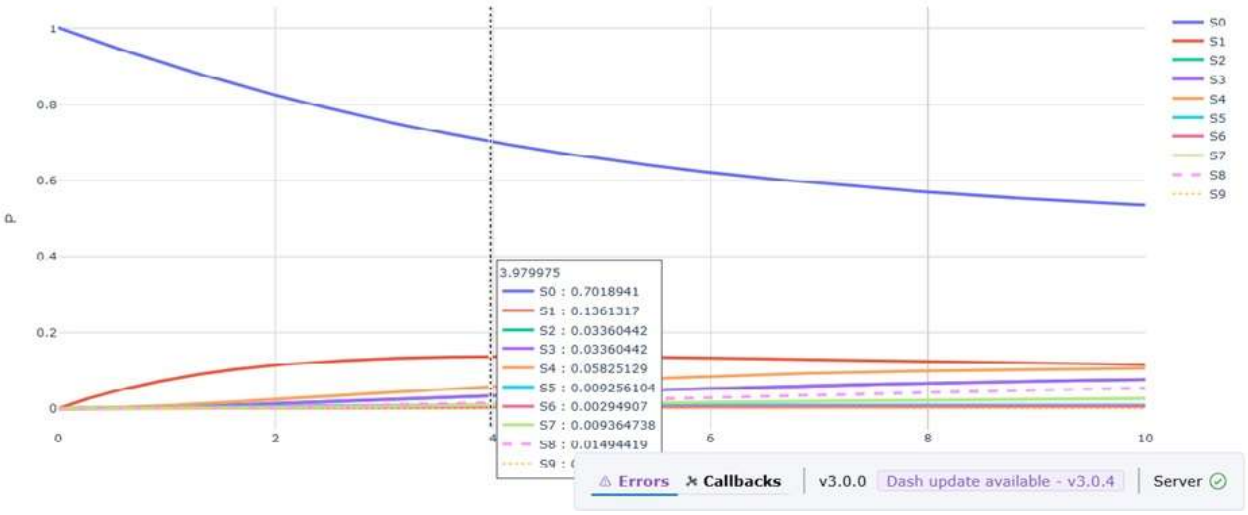


Рис. 3. Расчет вероятности Ps0(t) при восстановлении техники связи специалистами-ремонтниками

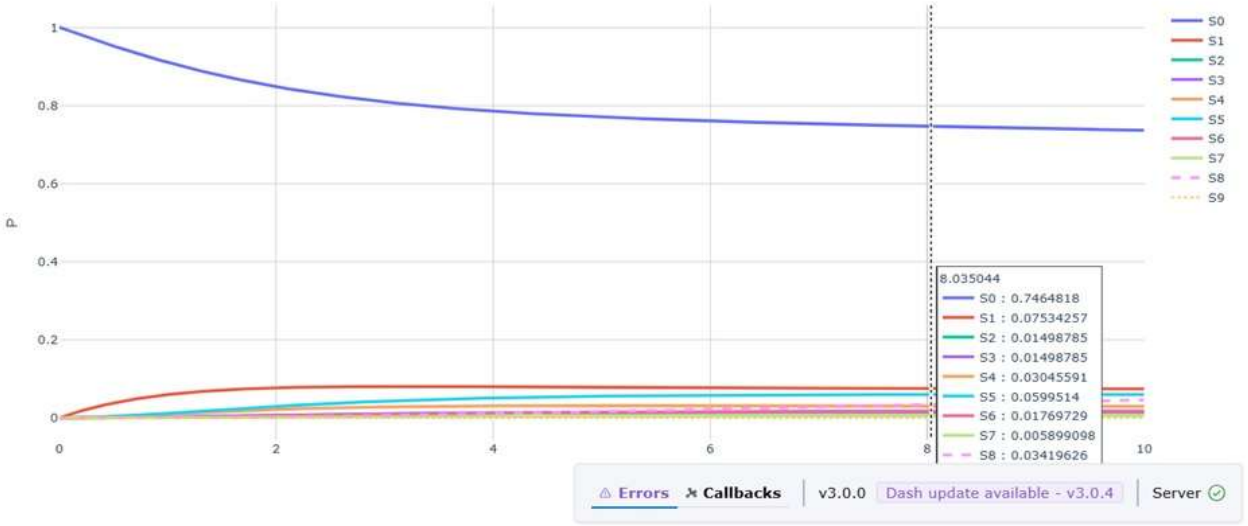


Рис. 4. Расчет вероятности Ps0(t) при восстановлении техники связи специалистами-ремонтниками и с применением резерва

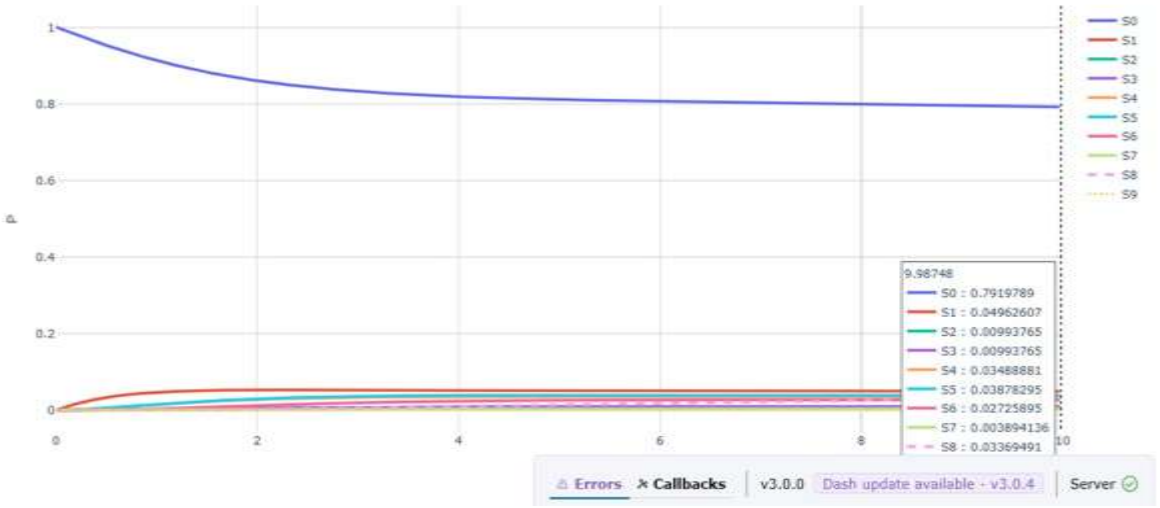


Рис. 5. Расчет вероятности Ps0(t) при восстановлении техники связи специалистами-ремонтниками, с применением резерва и ремонтных комплектов

Представленная модель позволяет исследовать:

1) динамику отказов и восстановления. Из приведенных выше уравнений видно, что отказ из $S0$ инициируется переходом в $S1$ с интенсивностью $\lambda 01$, а восстановление происходит через несколько каналов: $S2$, $S3$, $S4$. Такая структура делает возможным моделирование сложных сценариев отказов с последующим восстановлением;

2) влияние параметров на надежность системы. Из аналитических выражений (7)–(10) видно, что увеличение потока отказов снижает вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии P_S0, а увеличение интенсивности восстановления способствует ее повышению. Таким образом, анализ чувствительности модели к параметрам позволяет оценить надежность системы и определить оптимальные условия для поддержания ее работоспособности.

Разработанная модель на основе дифференциальных уравнений Колмогорова является инструментом для анализа динамики технических систем. Знание переходных процессов важно для понимания поведения системы в начальный период, при изменении параметров или после сбоев. С целью получения временных рядов вероятностей состояний, что может быть использовано для расчета таких показателей, как время достижения стационарного режима, перерегулирование, предлагается применять численное решение методом Рунге – Кутты. Также решение методом Рунге – Кутты может быть использовано для проверки правильности стационарного решения. Если численное решение сходится к стационарному, полученному из системы алгебраических уравнений, это подтверждает корректность модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитическая модель изменения состояния техники связи в системе ТОС и АСУ описывает вероятности нахождения средств связи в различных состояниях, как работоспособных, так и неработоспособных, с возможностью восстановления и без нее. Для каждого состояния определены соответствующие переходы, потоки отказов и интенсивности восстановления. В отличие от существующих модель расширяет класс возможных состояний объекта, что обеспечивает детализацию технических решений. Кроме того, модель дает физический смысл вероятностям нахождения объекта в каждом из состояний и вероятностям переходов между ними. Все это значительно упрощает вопросы определения показателей функционирования системы ТОС и АСУ как вероятностно-временных характеристик, зависимых от состояния

объекта исследования в текущий момент времени, прогноза потерь вследствие воздействия противника и принятой стратегии восстановления.

Научная новизна определяется тем, что модель, в отличие от разработанных ранее, включает учет проектно-конфигурационных решений (выбор структуры системы ТОС и АСУ) и алгоритмы функционирования, а также приоритеты восстановления при ограниченных ресурсах.

Теоретическая значимость заключается в дальнейшем развитии методов моделирования систем технического обеспечения, позволяющих анализировать влияние структурных параметров на их функционирование в различных условиях, применении процессов теории массового обслуживания в целях расширения научного инструментария исследований. Результаты могут служить основой для дальнейших исследований и оптимизации процессов восстановления в системах с ограниченными ресурсами.

Практическая значимость модели заключается в том, что внедрение разработанного специального программного обеспечения в систему поддержки принятия решения должностных лиц в ходе планирования и выполнения мероприятия технического обеспечения позволит выработать рекомендации по формированию структуры войсковых ремонтных органов, принять решение о формировании ремонтных комплектов как войскового, так и оперативного уровня и уменьшить цикл управления в системе ТОС и АСУ.

Список использованных источников

1. ГОСТ РВ 0158-006-2018. Связь военная. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2018. – 24 с.

2. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 40 с.

3. *Колмогоров А. Н.* Математика XIX века. Чебышевские направления в теории функций. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Вариационное исчисление. Теории конечных разностей. – М. : Наука, 1987. – 318 с.

4. *Топоров А. В., Бондарь М. С., Ахметьянов Р. В.* Материально-техническая поддержка в бою и операции: проблемный вопрос и направления его разрешения // Военная мысль. – 2022. – № 5. – С. 46–59.

5. Метод оптимизации структуры детерминированной сетевой модели / О. А. Коновалов [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. : Системный анализ и информационные технологии. – 2012. – № 2. – С. 111–116.

6. *Бердюгин И. С.* Постановка задачи на разработку модели функционирования системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения : материалы научно-практич. конф. – СПб. : ВАС, 2025. – С. 138–142.

7. *Бердюгин И. С.* Формирование рационального плана выполнения мероприятий технического обеспечения образцов вооружения, военной и специальной техники // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. – 2025. – № 2 (36). – С. 37–45.

8. *Вишняков Н. И.* Модель системы комплексного технического обслуживания и ремонта техники связи и автоматизированных систем управления в условиях воздействия противника // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2020. – № 3-4 (141-142). – С. 59–64.

9. *Семенов С. С., Воловиков В. С., Смолеха А. В.* Концептуальная модель процесса восполнения потерь техники связи и военно-технического имущества связи при применении соединения связи военного округа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 22–27.

А. В. Богданов[1],
доктор технических наук, профессор;
С. В. Максимович[2];
А. А. Толмачев[3],
доктор технических наук;
А. Л. Федер[4],
доктор военных наук, доцент;
Р. Д. Чижевский[5]
[1-3, 5] Военная академия Воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь.
[4] Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

МЕТОД ВСЕРАКУРСНОГО И ВСЕВЫСОТНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПА ОДИНОЧНОЙ, ТИПОВОГО СОСТАВА ГРУППОВОЙ ВОЗДУШНОЙ ЦЕЛИ В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ БОЕВЫХ ПОРЯДКОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАБЛЮДЕНИИ СИГНАЛОВ ВТОРИЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Представлен метод всеракурсного и всевысотного распознавания типа одиночной, типового состава групповой воздушной цели в различных видах боевых порядков при нестационарном наблюдении сигналов вторичной модуляции в импульсно-доплеровской радиолокационной системе, в котором используются два признака распознавания, а в качестве инструмента для принятия решения применяется многослойный персептрон.

Ключевые слова: метод распознавания типа одиночной и типового состава групповой воздушной цели, радиолокационный сигнал, отсчеты доплеровских частот, оценка траектории доплеровских частот, нейронная сеть, динамическая модель, спектральный и траекторный доплеровские портреты.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что в основу существующих методов и алгоритмов распознавания типа одиночной воздушной цели (ВЦ), типового состава групповой ВЦ (ГВЦ) из класса «самолет с турбореактивным двигателем (ТРД)» в импульсно-доплеровских радиолокационных системах (РЛС) при простом немодулированном зондирующем радиолокационном (РЛ) сигнале положен признак распознавания в виде взаимного частотного расположения (в дальнейшем, с целью сокращения записи, будет использоваться термин «разнос») спектральных составляющих в спектральном доплеровском (СДП) и траекторий доплеровских частот (ТДЧ) в траекторном доплеровском портрете (ТДП), обусловленных отражениями РЛ сигнала от планера одиночной ВЦ (планеров ГВЦ) (первичная модуляция РЛ сигнала) и вращающихся лопаток рабочего колеса (рабочих колес) компрессора (компрессоров) низкого давления (КНД) – при РЛ наблюдении ВЦ (ГВЦ) в переднюю полусферу или турбины – при РЛ наблюдении ВЦ (ГВЦ) в заднюю полусферу (вторичная модуляция РЛ сигнала). При этом, величина «разноса» спектральных составляющих (ТДЧ) в СДП (ТДП) зависит не только от типа самолета (самолетов) с ТРД, но и от высоты его (их) полета в различных видах (сомкнутый, разомкнутый, рассредоточенный) боевых порядков (БП). Так, например [2], вследствие изменения на 1 градус температуры воздуха с изменением высоты полета ВЦ тяга двигателей самолетов с ТРД может изменяться порядка на 2%, что априорно не учитывается при формировании границ указанных выше «разносов» при принятии решения о типе одиночной ВЦ (типа каждого самолета с ТРД в группе), т. е. приводит к ошибкам распознавания.

Кроме того, данным методам и алгоритмам присущ существенный недостаток, заключающийся в том, что РЛ сигналы вторичной модуляции имеют явную ракурсную зависимость,

не позволяющую осуществить именно всеракурсное распознавание типа одиночной ВЦ (типового состава ГВЦ), т. е. из-за изменения условий РЛ наблюдения ВЦ в РЛС (например, при совершении маневра «разворот», изменении курса полета) имеет место нестационарность РЛ наблюдения сигналов вторичной модуляции.

В подходе всеракурсного распознавания типа одиночной ВЦ (типового состава ГВЦ) [3] в качестве признака распознавания используется дисперсия производной доплеровской частоты, обусловленная отражениями РЛ сигнала от планера (планеров) одиночной ВЦ (ГВЦ), характерная для каждого типа самолета с ТРД.

Также известно [3–5], что в современных методах и алгоритмах распознавания типа ВЦ (типового состава ГВЦ) в качестве инструмента для принятия решения применяются нейронные сети, позволяющие уменьшить зависимость вероятности распознавания типа ВЦ (типового состава ГВЦ) от отношения сигнал/шум при различных условиях полета целей.

Кроме того, при рассмотрении вопросов распознавания типового состава ГВЦ рассматривалась, как правило, ситуация, когда самолеты летят в сомкнутом боевом порядке и не рассматривались вопросы подобного распознавания при полете самолетов в разомкнутых и рассредоточенных БП.

Исходя из вышеизложенного, возникает необходимость, во-первых, объединить в едином методе оба признака распознавания типа одиночной ВЦ (типового состава ГВЦ) для всеракурсного их распознавания, во-вторых, учесть при распознавании различные высоты полета целей и виды их БП, в-третьих, для принятия решения в качестве инструмента использовать нейронную сеть.

В настоящей статье рассматривается разработанный авторами метод всеракурсного и всевысотного распознавания типа одиночной ВЦ (типового состава ГВЦ) в различных видах БП при нестационарном наблюдении сигналов вторичной модуляции.

СТРУКТУРА МЕТОДА

На рис. 1 представлена структура предлагаемого метода, который включает следующие алгоритмы и блоки:

1) алгоритм (блок 1) формирования признаков всеракурсного и всевысотного распознавания типового состава ГВЦ для *обучения* нейронной сети;

2) алгоритм (блок 2) формирования *оценок* признаков всеракурсного и всевысотного распознавания при *принятии решения* о типе одиночной ВЦ (типовом составе ГВЦ) в различных видах БП;

3) блок 3 – нейронная сеть;

4) блок 4 – коммутатор.

Индексы «о» и «пр» означают соответственно режимы работы нейронной сети при обучении и принятии решения.

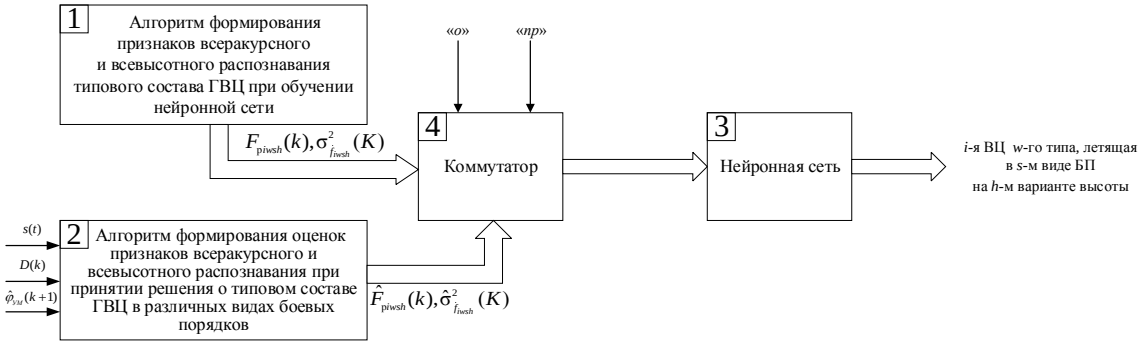


Рис. 1. Структура метода

СТРУКТУРА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ ВСЕРАКУРСНОГО И ВСЕВЫСОТНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

На рис. 2 представлена структура алгоритма (на рис. 1 – блок 1) формирования признаков всеракурсного и всевысотного распознавания типового состава ГВЦ для обучения нейронной сети, которая включает:

– блок 1 – блок формирования на основе динамических моделей последовательных во времени отсчетов доплеровских частот, соответствующих отражениям РЛ сигнала от планера (планеров) ВЦ (ГВЦ) (в дальнейшем, с целью сокращения записи, будут использоваться термины – «планер», ТДЧ «планеров») для различных высот полета и типов ВЦ (типового состава ГВЦ);

– блок 2 – блок формирования на основе динамических моделей последовательных во времени отсчетов доплеровских частот, соответствующих отражениям РЛ сигнала от вращающихся лопаток рабочего колеса (рабочих колес) первой (первых) ступени (ступеней) компрессора (компрессоров) низкого давления ТРД (далее будут использоваться термины – «компрессор», ТДЧ «компрессоров») для различных высот полета и типов ВЦ (типового состава ГВЦ);

– блок 3 – блок вычисления средних значений «разносов» ТДЧ для различных высот полета и типов ВЦ (ГВЦ);

– блок 4 –блок вычисления автокорреляционных функций (АКФ) моделей ТДЧ «планеров» и их параметров для различных высот полета и типов ВЦ (типового состава ГВЦ);

– блок 5 – блок вычисления дисперсий производной доплеровской частоты на основе параметров АКФ.

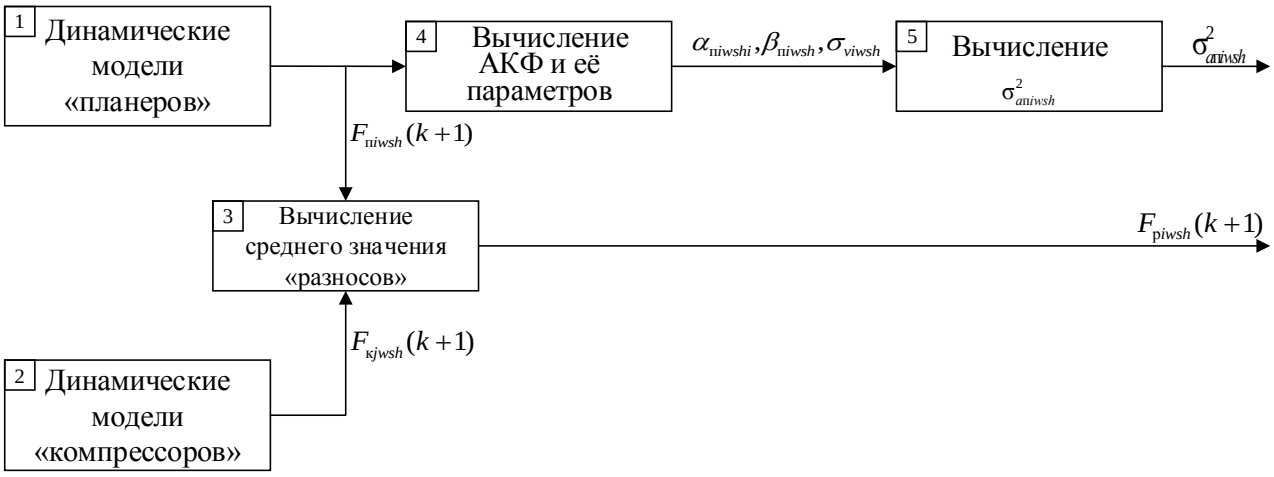


Рис. 2. Структура алгоритма формирования признаков всеракурсного и всевысотного распознавания типового состава ГВЦ для обучения нейронной сети

Согласно [6, 7] структура динамической модели радиальной ТДЧ, соответствующей отражениям РЛ сигнала от «планера» самолета, может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}
&\dot{F}_{0\text{пiwsh}}(t) = 0, && F_{0\text{пiwsh}}(0) = F_{00\text{пiwsh}};\\
&\Delta\dot{F}_{\text{пiwsh}}(t) = F^{a}{}_{\text{пiwsh}}(t), && \Delta F_{\text{пiwsh}}(0) = \Delta F_{0\text{пiwsh}};\\
&\dot{F}^{a}{}_{\text{пiwsh}}(t) = -\alpha_{\text{пiwsh}} F^{a}{}_{\text{пiwsh}}(t) - \beta_{\text{пiwsh}}\Delta F_{\text{пiwsh}}(t) + \sqrt{2\alpha_{\text{пiwsh}}\sigma^2_{aniwsh}}\, n_{\text{пiwsh}}(t), && F^{a}{}_{\text{пiwsh}}(0) = F^{a}{}_{0\text{пiwsh}}.
\end{aligned} \qquad (1)$$

Аналогично данной структуре динамическая модель радиальной ТДЧ, соответствующей отражениям РЛ сигнала от «компрессора», также может быть представлена как [6, 7]:

$$\begin{aligned}
&\dot{\Delta F}_{ijwsh}(t) = 0, && \Delta F_{ijwsh}(0) = \Delta F_{0ijwsh};\\
&\Delta \dot{F}_{кjwsh}(t) = F^{a}{}_{кjwsh}(t), && \Delta F_{кjwsh}(0) = \Delta F_{0кjwsh}; \qquad (2)\\
&\dot{F}^{a}{}_{кjwsh}(t) = -\alpha_{кjwsh} F^{a}{}_{кjwsh}(t) - \beta_{кjwsh}\Delta F_{кjwsh}(t) + \sqrt{2\alpha_{кjwsh}\sigma^2_{акjwsh}}\, n_{кjwsh}(t), && F^{a}{}_{кjwsh}(0) = F^{a}{}_{0кjwsh}.
\end{aligned}$$

где $i = \overline{1, I}$, I – общее количество «планеров»;

$j = \overline{1, J}$, J – общее количество «компрессоров»;

$w = \overline{1, W}$, W – общее количество типов самолетов с ТРД;

$s = \overline{1, S}$, S – общее количество видов БП (s = 1 – сомкнутый БП; s = 2 – разомкнутый БП; s = 3 – рассредоточенный БП);

$h = \overline{1, H}$, H – общее количество вариантов высот полета ВЦ;

$F_{0пiwsh}(t)$ – постоянное значение радиальной ТДЧ, соответствующее отражениям РЛ сигнала от «планера» i-го самолета, w-го типа, летящего в s-м виде БП на h-м варианте высоты;

$\Delta F_{пiwsh}(t)$ и $\Delta F_{кjwsh}(t)$ – флюктуационные значения радиальной ТДЧ, соответствующей отражениям РЛ сигнала соответственно от «планера» i-го самолета и «компрессора» j-го ($j = \overline{1, J}$) для w-го типа самолета, летящего в s-м виде БП на h-м варианте высоты;

$\Delta F_{ijwsh}(t)$ – постоянное значение разноса между i-й j-й радиальными ТДЧ, характерное для каждого w-го типа самолета, летящего в s-м виде БП на h-м варианте высоты;

$F^{a}{}_{пiwsh}(t)$ и $F^{a}{}_{кjwsh}(t)$ – флюктуационные значения производной радиальной ТДЧ, соответствующей отражениям РЛ сигнала соответственно от «планера» i-го самолета и j-го «компрессора» для каждого w-го типа самолета, летящего в s-м виде БП на h-м варианте высоты;

$n_{пiwsh}(t)$ и $n_{кjwsh}(t)$ – формирующие взаимонезависимые «белые» гауссовские шумы с нулевыми математическими ожиданиями (МОЖ) и единичными интенсивностями.

В выражениях (1) и (2) индексы «п» и «к» относятся к «планерам» и «компрессорам» соответственно.

В соответствии с данными структурами динамических моделей при обучении нейронной сети последовательность отсчетов радиальных ТДЧ формируется в соответствии со следующими выражениями (на выходе блоков 1 и 2, рис. 2):

$$\begin{aligned}
F_{пiwsh}(k+1) &= F_{0пiwsh}(k) + \Delta F_{пiwsh}(k) +\\
&+(1-\alpha_{пiwsh}T)F^{a}{}_{пiwsh}(k)T - \beta_{пiwsh}T^2\Delta F_{пiwsh}(k) + 2\alpha_{пiwsh}\sigma^2_{апiwsh}T;
\end{aligned} \qquad (3)$$

$$F_{кjwsh}(k+1) = F_{пiwsh}(k) - \Delta F_{ijwsh}(k) + (1-\alpha_{кjwsh}T)F^{a}{}_{кjwsh}(k)T - \beta_{кjwsh}T^2\Delta F_{кjwsh}(k) + 2\alpha_{кjwsh}\sigma^2_{акjwsh}T\,, \qquad (4)$$

откуда отчеты средних значений разносов (индекс «р») ТДЧ при фиксированных (априорно заданных) $i = j$ будут определяться, как (в блоке 3, рис. 2):

$$F_{\text{р}iwsh}(k+1)=[F_{\text{п}iwsh}(k+1)-F_{\text{к}iwsh}(k+1)]/2. \quad (5)$$

Данная величина $F_{\text{р}iwsh}(k+1)$ является признаком распознавания для каждого *i*-го самолета *w*-го типа, летящего в *s*-м виде БП на *h*-м варианте высоты при условии, что имеют место отражения РЛ сигнала от «компрессоров», т. е. при ограниченном ракурсе их РЛ наблюдения.

Для случая, когда РЛ сигналы вторичной модуляции не наблюдаются, при обучении нейронной сети формируются признаки распознавания в виде дисперсий производной доплеровской частоты на основе вычисления АКФ моделей ТДЧ «планеров» для различных высот полета и типов ВЦ (типового состава ГВЦ) следующим образом.

В соответствии с общим выражением

$$R_{F_{\text{п}iwsh}}\left(kT_{\text{д}}\right)=\left[\gamma\left(kT_{\text{д}}\right)/\left(K-k\right)\right]\sum_{b=0}^{K-k}\left[F_{\text{п}iwsh}(bT_{\text{д}})-m_{F_{\text{п}iwsh}}(bT_{\text{д}})\right]\times \\ \times\left[F_{\text{п}iwsh}((b+k)T_{\text{д}})-m_{F_{\text{п}iwsh}}(b+k)T_{\text{д}})\right], \quad (6)$$

где $T_{\text{д}}$ – интервал дискретизации;

b – величина сдвига АКФ в дискретном времени;

$m_{F_{\text{п}iwsh}}(bT_{\text{д}})$ – изменяющиеся во времени математические ожидания (тренды) ТДЧ $F_{\text{п}iwsh}(bT_{\text{д}})$, аппроксимируемые функциями, коэффициенты которых определяются на основе теории средней квадратичной регрессии [8];

$\gamma\left(kT_{\text{д}}\right)$ – весовое окно Хемминга [9], $\gamma\left(kT_{\text{д}}\right)=0,54+0,46\cos\left(\pi kT_{\text{д}}/K\right)$ при $k = 0, 1, ..., K$,

для последовательности отсчетов радиальных ТДЧ «планеров» (3) вычисляются соответствующие значения АКФ $R_{F_{\text{п}iwsh}}\left(kT_{\text{д}}\right)$ (рис. 2, блок 4), которые могут быть с достаточной точностью аппроксимированы спадающей по экспоненциальному закону косинусоидальной зависимостью [10]. Параметрами таких АКФ являются величины $\alpha_{\text{п}iwsh}$, $\beta_{\text{п}iwsh}$, σ_{viwsh} (где σ_{viwsh} – среднеквадратическое отклонение соответствующих скоростных флюктуаций), которые зависят, от типа цели, вида БП и варианта высоты полета. По данным значениям параметров АКФ вычисляются (рис. 2, блок 5) соответствующие дисперсии производных доплеровских частот согласно выражению

$$\sigma^2_{a\text{п}iwsh}=4\sigma^2_{viwsh}(\alpha^2_{\text{п}iwshi}+\beta_{\text{п}iwsh})/\lambda^2, \quad (7)$$

где λ – длина волны РЛС.

Величина $\sigma^2_{a\text{п}iwsh}$ является признаком распознавания для каждого *i*-го самолета *w*-го типа, летящего в *s*-м виде БП на *h*-м варианте высоты при условии, что отсутствуют отражения РЛ сигнала от «компрессоров», т. е. это всеракурсный признак распознавания.

СТРУКТУРА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ОЦЕНОК ПРИЗНАКОВ ВСЕРАКУРСНОГО И ВСЕВЫСОТНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

На рис. 3 представлена структура алгоритма формирования оценок признаков всеракурсного и всевысотного распознавания при принятии решения о типе одиночной ВЦ (типовом составе ГВЦ) при их полете на различных высотах и видах БП.

Данный алгоритм включает следующие процедуры:

– быстрого преобразования Фурье (блок 1 – БПФ);

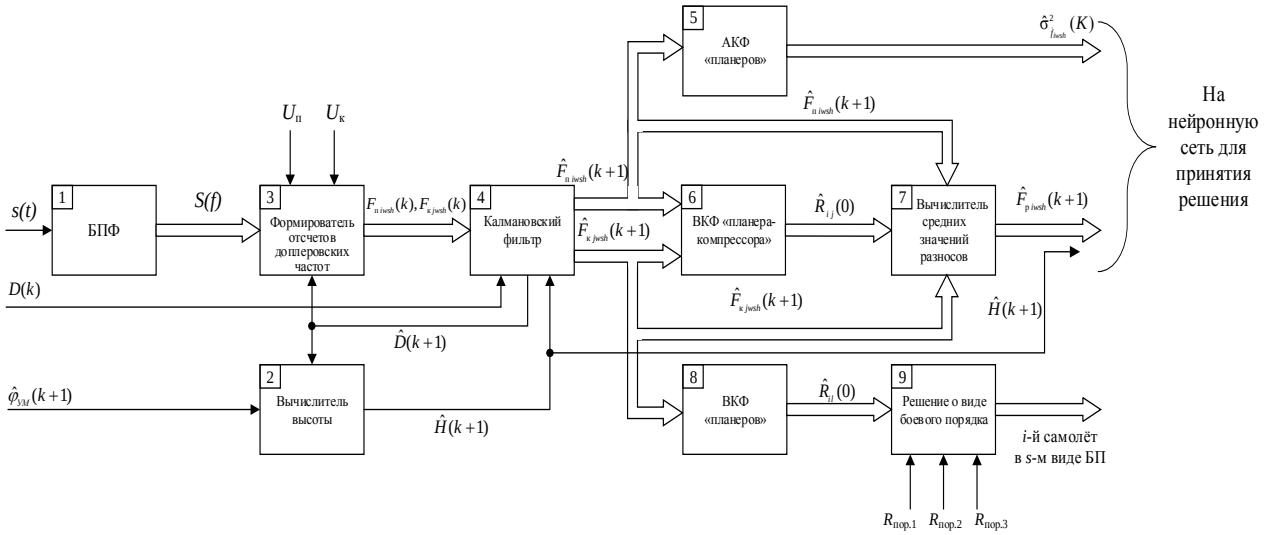


Рис. 3. Структура алгоритма формирования признаков всеракурсного и всевысотного распознавания типового состава ГВЦ при принятии решения нейронной сетью

– вычисления (в дискретном времени) оценки высоты $\hat{H}(k+1)$ полета ВЦ (ГВЦ) (блок 2);

– формирования отсчетов доплеровских частот «планеров» $F_{\text{пі}}(k)$ и «компрессоров» $F_{\text{кj}}(k)$ (блок 3);

– формирования оценок доплеровских частот $\hat{F}_{\text{пі}}(k+1)$ и $\hat{F}_{\text{кj}}(k+1)$ (блок 4) в различных видах БП;

– формирования оценок всеракурсных и всевысотных признаков распознавания $\hat{\sigma}^2_{a\text{п}iwsh}$ (блок 5) в различных видах БП;

– формирования оценок всевысотных признаков распознавания $\hat{F}_{\text{р}\,iwsh}$ при ограниченном ракурсе РЛ наблюдения сигналов вторичной модуляции (блоки 6 и 7);

– формирования признака *s*-м виде (сомкнутый, разомкнутый, рассредоточенный) БП (блоки 8 и 9).

В блоке 1 (рис. 3) с помощью процедуры БПФ осуществляется преобразование РЛ сигнала $S(t)$ из временной области в частотную. В результате такого преобразования формируется амплитудно-частотный спектр (АЧС) $S(f)$ с ТРД при ограниченном ракурсе РЛ наблюдения сигналов вторичной модуляции. На рис. 4 приведен пример АЧС для пары самолетов (индексы «1» и «2» соответственно).

В блоке 2 в дискретном времени осуществляется вычисление оценки высоты $\hat{H}(k+1)$ полета ВЦ (ГВЦ):

$$\hat{H}(k+1) = \hat{D}(k+1)\sin\hat{\varphi}_{\text{ум}}(k+1), \tag{8}$$

где $\hat{D}(k+1)$ – оценка дальности в дискретном времени между РЛС и ВЦ, формируемая в блоке 4 при поступлении на его вход измеренного значения дальности $D(k)$ в дискретном времени с выхода измерителя дальности РЛС;

$\hat{\varphi}_{\text{ум}}(k+1)$ – оценка в дискретном времени угла места полета ВЦ относительно РЛС, поступающая с выхода следящего угломера РЛС.

Процедура формирования отсчетов доплеровских частот (см. рис. 3, блок 3) «планеров» $F_{пi}(k)$ [в частности $F_{п1}(k)$, $F_{п2}(k)$] и «компрессоров» $F_{кj}(k+1)$ [в частности $F_{к1}(k), F_{к2}(k)$] АЧС $S(f)$ (рис. 4) включает следующие операции:

– по значению производной оценки дальности в дискретном времени $\dot{D}(k)$ между РЛС ВЦ вычисляется оценка отсчета доплеровской частоты $\hat{F}_{пд}(k+1)$:

$$\hat{F}_{пд}(k+1) = 2\dot{D}(k+1)/\lambda; \qquad (9)$$

– относительно значения $\hat{F}_{пд}(k+1)$ определяется область $\Delta F_{п}$ отсчетов доплеровских частот «планеров»;

– относительно левой границы области отсчетов $\Delta F_{п}(k)$ доплеровских частот «планеров» на «частотном расстоянии» $\Delta F_{пк}$ определяется область $\Delta F_{к}$ отсчетов доплеровских частот «компрессоров»;

– в областях отсчетов доплеровских частот $\Delta F_{п}$ и $\Delta F_{к}$ устанавливаются соответствующие пороги $U_{п}$ и $U_{к}$, при превышении которых формируются отсчеты доплеровских частот «планеров» $F_{пi}(k)$ [в частности $F_{п1}(k)$, $F_{п2}(k)$] и «компрессоров» $F_{кj}(k)$ (в частности $F_{к1}(k)$, $F_{к2}(k)$) АЧС $S(f)$.

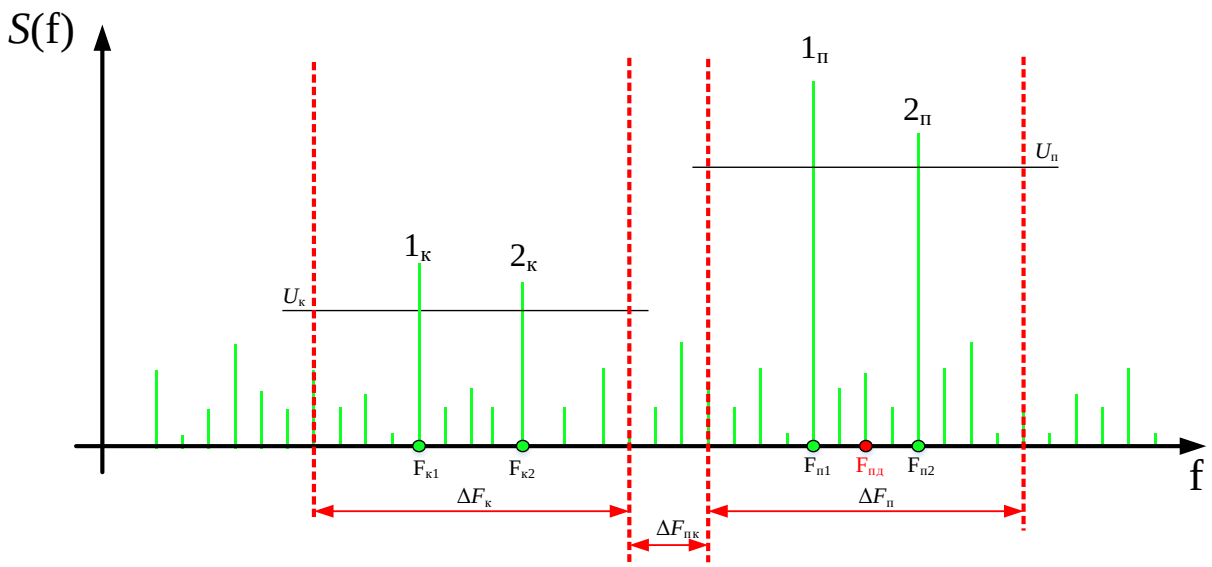


Рис. 4. Эпюр, поясняющий формирование отсчетов доплеровских частот

Процедура формирования оценок доплеровских частот $\hat{F}_{пi}(k+1)$ [в частности, $\hat{F}_{п1}(k+1)$ и $\hat{F}_{п2}(k+1)$, см. рис. 3] и $\hat{F}_{кj}(k+1)$ [в частности, $\hat{F}_{к1}(k+1)$ и $\hat{F}_{к2}(k+1)$] осуществляется в блоке 4 (см. рис. 3) на основе оптимальной дискретной линейной многомерной калмановской фильтрации [11–13]. Данная процедура выполняется в различных калмановских фильтрах, в которых априорные сведения, принятые при фильтрации в виде динамических моделей, учитывают различные типы, высоты и виды БП. В результате на выходе блока 4 формируются соответствующие оценки доплеровских частот для каждого вида БП, представленные на рис. 5.

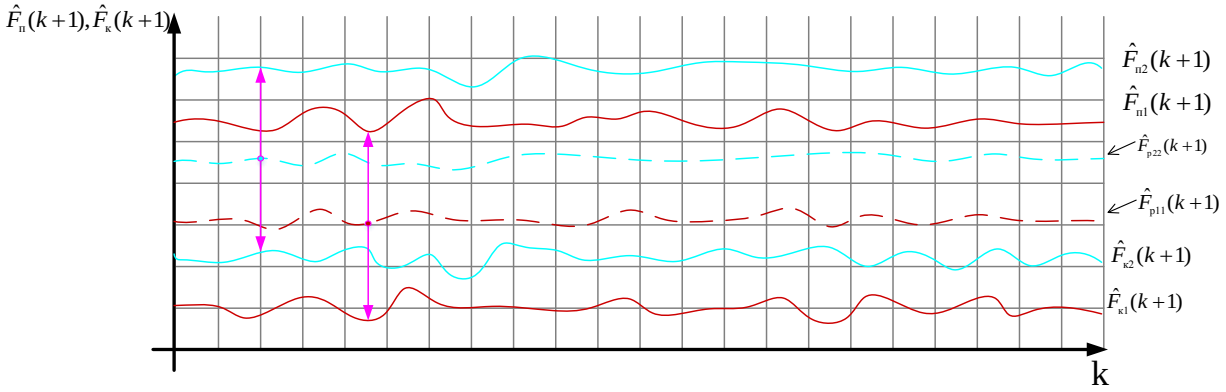


Рис. 5. Вид оценки доплеровских частот, формируемых на выходе блока 4

Процедура формирования оценок всеракурсных признаков распознавания $\hat{\sigma}^2_{пiwsh}$ типового состава ГВЦ с учетом ее высоты полета и вида БП осуществляется в блоке 5 путем вычисления оценок АКФ «планеров» за K тактов формирования оценок доплеровских частот «планеров» в соответствии с общим выражением

$$\hat{R}_{F_{пiwsh}}\left(kT_д\right)=\left[\gamma\left(kT_д\right)/\left(K-k\right)\right]\sum_{b=0}^{K-k}\left[\hat{F}_{пiwsh}(bT_д)-m_{F_{пiwsh}}(bT_д)\right]\times \\ \times\left[\hat{F}_{пiwsh}((b+k)T_д)-m_{F_{пiwsh}}(b+k)T_д)\right]. \quad (10)$$

На основе оценок параметров АКФ $\hat{\alpha}_{пiwsh}, \hat{\beta}_{пiwsh}, \hat{\sigma}_{viwsh}$ вычисляются соответствующие оценки дисперсии производных доплеровских частот:

$$\hat{\sigma}^2_{апiwsh}=4\hat{\sigma}^2_{viwsh}(\hat{\alpha}^2_{пiwshi}+\hat{\beta}_{пiwsh})/\lambda^2. \quad (11)$$

Сформированные оценки дисперсии производных ТДЧ $\hat{\sigma}^2_{апiwsh}$ и будут являться всеракурсными, всевысотными (когда отсутствуют отражения РЛ сигнала от «компрессоров») оценками признаков распознавания i-го самолета w-го типа, летящего в s-м виде БП на h-м варианте высоты.

Процедура формирования оценок признаков распознавания $\hat{F}_{piwsh}(k+1)$ при ограниченном ракурсе РЛ наблюдения сигналов вторичной модуляции осуществляется в блоках 6 и 7 (см. рис. 3). В блоке 6 вычисляются оценки взаимокорреляционных функций (ВКФ) между оценками ТДЧ каждого «планера» $\hat{F}_{пiwsh}(k+1)$ и каждого «компрессора» $\hat{F}_{кjwsh}(k+1)$ в соответствии с выражением

$$\hat{R}_{ij}\left(kT_д\right)=\left[\gamma\left(kT_д\right)/\left(K-k\right)\right]\sum_{b=0}^{K-k}\left[\hat{F}_{пiwsh}(bT_д)-m_{F_{пiwsh}}(bT_д)\right]\times \\ \times\left[\hat{F}_{кjwsh}((b+k)T_д)-m_{F_{кjwsh}}(b+k)T_д)\right]. \quad (12)$$

В частности (рис. 6):

$\hat{R}_{11}(k+1)$ – оценка ВКФ между оценками ТДЧ $\hat{F}_{п1}(k+1)$ и $\hat{F}_{к1}(k+1)$;

$\hat{R}_{12}(k+1)$ – оценка ВКФ между оценками ТДЧ $\hat{F}_{п1}(k+1)$ и $\hat{F}_{к2}(k+1)$;

$\hat{R}_{21}(k+1)$ – оценка ВКФ между оценками ТДЧ $\hat{F}_{п2}(k+1)$ и $\hat{F}_{к1}(k+1)$;

$\hat{R}_{22}(k+1)$ – оценка ВКФ между оценками ТДЧ $\hat{F}_{п2}(k+1)$ и $\hat{F}_{к2}(k+1)$.

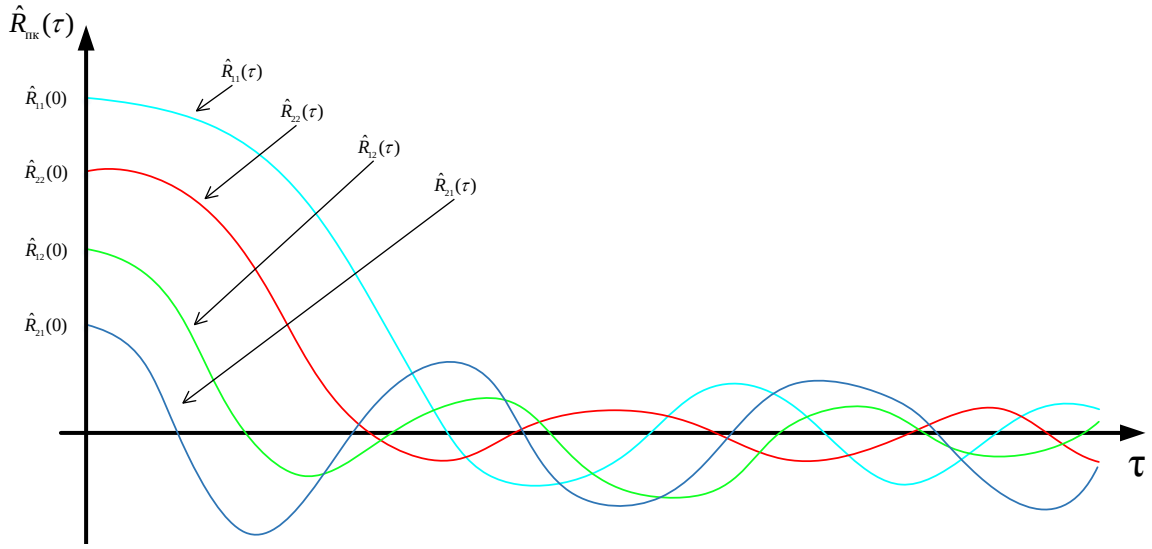


Рис. 6. Эпюры ВКФ траекторий доплеровских частот «планеров» и «компрессоров»

По максимальным значениям ВКФ при нулевом сдвиге осуществляется идентификация соответствия каждой оценки ТДЧ «планера» каждой оценке ТДЧ «компрессора». В частности (рис. 6), $\hat{R}_{11}(0)$ и $\hat{R}_{22}(0)$ имеют из четырех значений оценок ВКФ максимальные значения. С учетом этих значений в блоке 7 (см. рис. 3) вычисляются соответствующие оценки признаков распознавания $\hat{F}_{piwsh}(k+1)$ при ограниченном ракурсе РЛ наблюдения сигналов вторичной модуляции, как средние значения соответствующих оценок разностей между идентифицированными парами $\hat{F}_{пiwsh}(k+1)$ и $\hat{F}_{кjwsh}(k+1)$. В частности, $\hat{F}_{p11}(k+1)$ и $\hat{F}_{p22}(k+1)$ (см. рис. 5, пунктирные кривые).

Процедура формирования признака в s-м виде БП осуществляется в блоках 8 и 9 (см. рис. 3). Так, в блоке 8 осуществляется вычисление оценок коэффициентов взаимной корреляции R_{il} каждой i-й оценки ТДЧ «планера» с каждой l-й оценкой ТДЧ «планера» в соответствии с выражением

$$\hat{R}_{il} = \frac{\hat{R}_{F_{ilwsh}}(0)}{\sqrt{\hat{R}_{F_{пiwsh}}(0)}\sqrt{\hat{R}_{F_{пlwsh}}(0)}} \quad \text{при } i,l = 1,I,\ i \neq l, \tag{13}$$

где $\hat{R}_{F_{il}}(0)$ – оценка ВКФ (при нулевом сдвиге) каждой i-й оценки ТДЧ «планера» с каждой l-й оценкой ТДЧ «планера», вычисляемая в соответствии с общим выражением

$$\hat{R}_{F_{ilwsh}}\left(kT_д\right) = \left[\gamma\left(kT_д\right)/\left(K-k\right)\right]\sum_{b=0}^{K-k}\left[\hat{F}_{пiwsh}(bT_д) - m_{F_{пiwsh}}(bT_д)\right]\times \\ \times\left[\hat{F}_{плwsh}((b+k)T_д) - m_{F_{плwsh}}(b+k)T_д)\right], \tag{14}$$

$\hat{R}_{F_{пiwsh}}(0)$ и $\hat{R}_{F_{плwsh}}(0)$ – оценки значений (в нуле) АКФ соответствующих i,l-х оценок ТДЧ «планеров», вычисляемые в соответствии с общим выражением (10) при $i,l = \overline{1,I}$, $i \neq l$.

Вычисляются модули оценок коэффициентов взаимной корреляции $|\hat{R}_{il}|$ которые сравниваются в блоке 9 с пороговыми значениями $R_{\text{пор.1}}$, $R_{\text{пор.2}}$, $R_{\text{пор.3}}$.

Если значение модуля оценки коэффициента взаимной корреляции $|\hat{R}_{il}|$ попадает в подинтервал $R_{\text{пор.1}} \le |\hat{R}_{il}| \le 1$ (где $R_{\text{пор.1}}$ – значение порога, при превышении которого взаимная корреляция оценок доплеровских частот $\hat{F}_{\text{пі}}(k+1)$ и $\hat{F}_{\text{пl}}(k+1)$ является «сильной»), то принимается решение о том, что *i*-й и *l*-й самолеты осуществляют полет в сомкнутом БП.

Если значение модуля оценки коэффициента взаимной корреляции $|\hat{R}_{il}|$ попадает в подинтервал $R_{\text{пор.2}} \le |\hat{R}_{il}| < R_{\text{пор.1}}$ (где $R_{\text{пор.2}}$ – значение порога, при превышении которого взаимная корреляция оценок доплеровских частот $\hat{F}_{\text{пі}}(k+1)$ и $\hat{F}_{\text{пl}}(k+1)$ является «средней»), то принимается решение о том, что *i*-й и *l*-й самолеты осуществляют полет в разомкнутом БП.

Если значение модуля оценки коэффициента взаимной корреляции $|\hat{R}_{il}|$ попадает в подинтервал $R_{\text{пор.3}} \le |\hat{r}_{ij}| < R_{\text{пор.2}}$ (где $R_{\text{пор.3}}$ – значение порога, при превышении которого взаимная корреляция оценок доплеровских частот $\hat{F}_{\text{пі}}(k+1)$ и $\hat{F}_{\text{пl}}(k+1)$ является «слабой»), то принимается решение о том, что *i*-й и *l*-й самолеты осуществляют полет в рассредоточенном боевом порядке.

Если значение модуля оценки коэффициента взаимной корреляции $|\hat{R}_{il}|$ попадает в подинтервал $0 \le |\hat{R}_{il}| < R_{\text{пор.3}}$, то взаимная корреляция оценок доплеровских частот $\hat{F}_{\text{пі}}(k+1)$ и $\hat{F}_{\text{пl}}(k+1)$ является «незначительной» и принимается решение о том, что *i*-й и *l*-й самолеты являются одиночными воздушными целями, летящими вне группы.

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ, КОММУТАТОР

В качестве нейронной сети (см. рис. 1, блок 4), как инструмента для принятия решения целесообразно применить аналогичный, как и в [14], многослойный персептрон, который обеспечивает долю правильных ответов по тестовой выборке до 99,5% с минимальным временем обучения.

С помощью коммутатора (см. рис. 1, блок 4) осуществляется переключение нейронной сети из режима обучения («о») в режим принятия решения («пр»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен метод всеракусного и всевысотного распознавания типа одиночной ВЦ (типового состава ГВЦ) в различных видах БП при нестационарном наблюдении сигналов вторичной модуляции. В нем используются либо два признака распознавания («разнос» ТДЧ и дисперсия производной доплеровской частоты) при наблюдении РЛ сигналов вторичной модуляции, либо один признак (только дисперсия производной доплеровской частоты) при отсутствии РЛ наблюдения сигналов вторичной модуляции. В качестве инструмента для принятия решения о типе одиночной ВЦ (типовом составе ГВЦ) применяется многослойный персептрон с приемлемыми на практике характеристиками.

Список использованных источников

1. Методы и алгоритмы распознавания воздушных целей в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях / А. В. Богданов [и др.]. – Тверь : ВА ВКО, 2024. – 226 с.

2. *Медников В. Н.* Динамика полетов и пилотирование самолетов. – Монино : Военно-воздушная академия имени Ю. А. Гагарина, 1976. – 547 с.

3. Пат. № 2816189 Российская Федерация, МПК G01S 13/52 (2006.01). Способ всеракурсного распознавания в радиолокационной станции типового состава групповой воздушной цели при различных условиях полета и воздействии уводящих по скорости помех на основе калмановской фильтрации и нейронной сети / Максимович С. В. [и др.]; заявитель ВА ВКО. – № 2023128174 ; заявл. 30.10.2023 ; опубл. 26.03.2024, Бюл. № 9. – 20 с.

4. Пат. № 2802653 Российская Федерация, МПК G01S 13/52(2006.01). Способ распознавания типового состава групповой воздушной цели различных классов при различных условиях ее полета на основе калмановской фильтрации и нейронной сети / Богданов А. В. [и др.]; заявитель ВА ВКО. – № 2022125955 ; заявл. 04.10.2022 ; опубл. 30.08.2023, Бюл. № 25. – 16 с.

5. Синтез оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети / А. В. Богданов [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2022. – № 15(3). – С. 230–245.

6. *Ярлыков М. С.* Статистическая теория радионавигации. – М. : Радио и связь, 1985. – 344 с.

7. Методика построения динамических моделей радиальных скоростей и ускорений пары воздушных целей, летящих в сомкнутом боевом порядке / А. В. Богданов [и др.] // Теория и системы управления. – 2007. – № 4. – С. 137–147.

8. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 832 с.

9. *Херрис Ф. Дж.* Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, № 1. – С. 60–96.

10. *Ярлыков М. С.* Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. – М. : Сов. радио, 1980. – 358 с.

11. *Тихонов В. И.* Оптимальный прием сигналов. – М. : Сов. радио, 1983. – 320 с.

12. *Казаринов Ю. М., Соколов А. И., Юрченко Ю. С.* Проектирование устройств фильтрации радиосигналов. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1985. – 159 с.

13. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем : учеб. пособие для вузов. – М. : Радио и связь, 1991. – 608 с.

14. *Максимович С. В.* Характеристики нейронной сети, принимающей решение при распознавании класса летательного аппарата // Вестник ВКО. – 2024. – № 3 (44). – С. 86–91.

Ю. В. Бурцев[1],
кандидат технических наук;
Ю. В. Колковский[2],
доктор технических наук, профессор
[1, 2] АО «НПП «Пульсар», г. Москва.

НАЗЕМНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ВЫСОКОДЕТАЛЬНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ОБРАЩЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Представлены результаты наземных натурных испытаний методом обращенного эксперимента высокодетального радиолокационного комплекса с синтезированной апертурой космического базирования, разработанного АО «НПП «Пульсар».

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, инверсный синтез, космические объекты-мишени, пространственные и радиометрические характеристики, радиолокационное изображение.

ВВЕДЕНИЕ

Целью наземных натурных испытаний высокодетального радиолокационного комплекса (ВРЛК) является отработка характеристик сквозного радиотехнического и информационного трактов в условиях использования полного энергетического потенциала радиолокатора.

Метод обращенного эксперимента позволяет провести проверку на Земле в условиях, приближенных к штатным (дальность до объекта, скорость объекта, углы сканирования, диапазон изменения ЭПР), сквозного радиотехнического и информационного трактов ВРЛК, осуществить оценку радиометрических характеристик и характеристик пространственного разрешения на этапе комплексных отработочных испытаний.

Понятие инверсного синтеза (в англоязычной литературе – *Inverse Synthesis Aperture*) хорошо известно за рубежом и широко используется в радиолокационных системах контроля космического пространства. В то же время, при всей внешней очевидности идеи эксперимента существует ряд проблемных вопросов, обусловливающих существенные затруднения при достижении его целевого эффекта. К их числу, в первую очередь, следует отнести:

– обеспечение устойчивости «захвата» тестовой мишени в условиях изначально фиксированного положения диаграммы направленности антенны (ДНА) при значимой ограниченности ее ширины;

– повторяемость результатов эксперимента.

Тем не менее, неоспоримые преимущества проверки параметров ВРЛК по удаленной цели с использованием процедуры инверсного синтеза состоят в следующем:

– проверка производится в натурных условиях на больших дальностях с полным энергетическим потенциалом ВРЛК и с использованием когерентного накопления отраженных сигналов;

– радиолокационный «портрет» цели формируется при отсутствии помех от земной поверхности и эффектов неоднозначности по дальности и азимуту, что позволяет в полной степени выявить влияние корреляционного шума зондирующего сигнала на качество получаемых радиолокационных изображений (РЛИ) и, в частности, провести сравнение линейно частотно-модулированных сигналов (ЛЧМ) и сигналов с фазокодовой модуляцией (ФКМ сигналов);

– в процессе натурных испытаний производится проверка внутренней электромагнитной совместимости БА ВРЛК (фиксация влияния мощного электромагнитного излучения радиолокатора на цепи управления и формирования кадра радиолокационной информации).

ОРГАНИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Объектом испытаний являлся высокодетальный радиолокационный комплекс (рис. 1) с синтезированной апертурой космического базирования с характеристиками, приведенными в табл. 1.



Рис. 1. АФАР ВРЛК на испытательном стенде

Таблица 1

Характеристики АФАР ВРЛК

Параметр	Значение
Масса ВРЛК	1158 кг
Размеры АФАР	5745*1775 мм
Количество модулей: – активных – пассивных	 40 10
Ширина ДН в азимутальном направлении Θ_{ax}	0,28º
Ширина ДН в угломестном направлении Θ_{ay}	1,2º
Диапазон сканирования по азимуту	± 1,5º
Диапазон сканирования по углу места	± 15º

Наземные натурные испытания ВРЛК (обращенный эксперимент) позволяют:

– комплексно оценить качество сквозного радиотехнического тракта, диагностировать и оперативно устранить недостатки в функционировании составных частей ВРЛК;

– провести оценку для условий эксперимента радиометрической чувствительности ВРЛК, пространственной разрешающей способности, динамического диапазона РЛИ и радиометрического разрешения в условиях радиолокации техногенных космических объектов (при расстояниях до объекта съемки 600–1000 км);

– провести отработку основных алгоритмов и режимов электронного сканирования луча АФАР;

– сравнить качество РЛИ, получаемых при использовании ЛЧМ и ФКМ зондирующих сигналов.

При этом строгое подтверждение информационных характеристик радиолокационных изображений, формируемых ВРЛК (разрешающая способность, радиометрическая чувствительность и др.), в рамках данных испытаний невозможно. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

1) орбитальные объекты-мишени, как правило, не являются метрологически аттестованными радиолокационными целями;

2) требования к точности знания параметров движения центра масс (ПДЦМ) объекта-мишени, необходимой при проведении синтеза детальных радиолокационных изображений (РЛИ), существенно выше, чем у ПДЦМ, доступных для использования в данном виде испытаний;

3) ограничения по секторам наблюдаемости небесной сферы приводят к тому, что параметры доплеровского спектра радиолокационного сигнала, полученного от орбитального объекта, существенно отличаются от параметров, реализуемых в штатных режимах съемки земной поверхности.

Также следует учитывать влияние специфических условий наблюдения космических объектов на чувствительность приемной системы ВРЛК.

Шумовая температура приемной системы в обращенном эксперименте будет отличаться от шумовой температуры при зондировании с орбиты в силу того, что антенна в первом случае смотрит вверх в космическое пространство, а во втором – на Землю. За счет этого будет различный вклад внешних шумов в шумовую температуру приемной системы. Максимальный вклад в шумовую температуру приемной системы будет составлять менее 10°К при углах визирования более 10° от горизонта. В случае зондирования с орбиты вклад шумов Земли составляет 270–290°К.

Следовательно, при обращенном эксперименте чувствительность приемной системы будет выше в 1,5 раза (на 1,7 дБ), чем в штатном режиме работы ВРЛК.

В целом же, как, впрочем, и всегда, корректность выполнения исследований с получением требуемых экспериментальных данных является прямым следствием уровня организации и всестороннего обеспечения проведения обращенного эксперимента.

ФОРМИРОВАНИЕ МИШЕННОЙ ОБСТАНОВКИ

Основным критерием при выборе космической мишени являлось соблюдение двух условий: объект радиолокационной съемки должен иметь большие геометрические размеры (число элементов пространственного разрешения радиолокатора на его площади должно быть не менее 100) и он должен содержать элементы с высокими значениями эффективной площади рассеяния для обеспечения динамического диапазона радиолокационного изображения не менее 20 дБ.

Из техногенных космических объектов оптимальным образом на роль космической мишени подходит международная космическая станция (МКС) (рис. 2). Размеры МКС составляют (110×73×27) м [1]. При максимальной площади проекции на плоскость максимальное число пикселей в радиолокационном кадре при параметре пространственного разрешения радиолокатора 1 м составит более 8000. При неудачных ракурсах это число может уменьшиться примерно в 3 раза. Учитывая статистику радиолокационных изображений техногенных космических объектов, можно полагать, что число пикселей, содержащих информацию об отражательной способности МКС в снимаемом кадре, составит не более 35 % от общего числа пикселей в кадре.

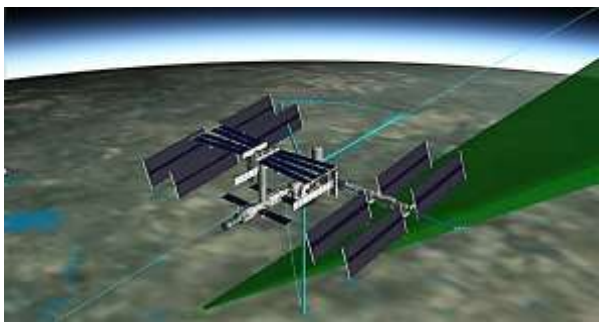


Рис. 2. Схематичное изображение положения МКС на траектории относительно точки наблюдения перед пролетом ДНА

Таким образом, ожидаемое информационное число пикселей на радиолокационном изображении МКС составляет около 900.

Для калибровки экспериментальных РЛИ в качестве тестовых мишеней были выбраны:

– КО COSMOS 2492 (SKRL-756), калибровочная сфера диаметром 0,756 м на околокруговой орбите высотой порядка 600 км;

– КО COSMOS 2493 (SKRL-756) с аналогичными геометрическими и баллистическими характеристиками [2];

– КО COSMOS 2292 (Тайфун-1), калибровочная сфера диаметром 2 м на околокруговой орбите высотой порядка 500 км [3].

ВЫБОР РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛИГОНА

Для проведения обращенного эксперимента была выбрана территория Центра космической связи «Медвежьи озера» ОКБ МЭИ в городском округе Щёлково Московской области (рис. 3).



Рис. 3. Географическое положение радиотехнического полигона и контур зоны радиолокационного доступа по критерию $\gamma > 30°$ (синей линией обозначена проекция трассы МКС на земную поверхность в положении ее максимальной близости к радиолокационному полигону)

Выбор места дислокации полигона был обусловлен, в первую очередь, выполнением условий радиолокационного доступа при радиолокации космических мишеней наземным радиолокатором, а также наличием разрешения федеральных органов по контролю за использованием радиочастот на излучение в открытое пространство с территории подмосковного по-

лигона сигналов радиолокатора в **X** диапазоне с пиковой мощностью до 20 кВт, не лимитированными возможностями по энергообеспечению эксперимента и хорошей транспортной доступностью района дислокации.

Наблюдения выполнялись из точки с географическими координатами: 55.8515° СШ, 37.9609° ВД, высота над уровнем моря 156 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЩЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Выполнено 400 сеансов (табл. 2) по различным космическим объектам. Общее время работы наиболее нагруженного элемента ВРЛК – АФАР в различных погодных условиях составило более 500 часов.

Таблица 2

Характеристики сеансов работы обращенного эксперимента

Режимы	Количество реализаций	Количество обнаружений объекта	Количество промахов	Процент успешных реализаций
Детальный	187	129	58	69
Маршрутный	171	147	24	86
Обзорный	18	6	12	36
Селекция движущихся целей	18	5	13	29
Вертикальная и горизонтальная поляризации	6	3	3	50
Итого	400	290	110	72,5

Основные характеристики ВРЛК были подтверждены в рамках натурных испытаний по космическим объектам на штатных значениях наклонной дальности 600–1000 км. При реализации детального режима получены РЛИ объектов-мишеней (рис. 4, 5) с разрешением по дальности и азимуту, превышающими требования ТЗ и не уступающими лучшим зарубежным аналогам.

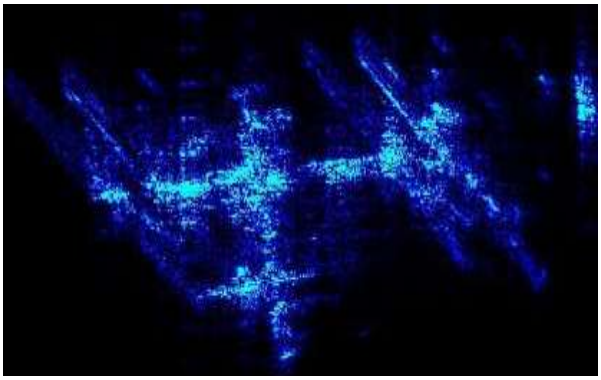


Рис. 4. РЛИ МКС, детальный режим

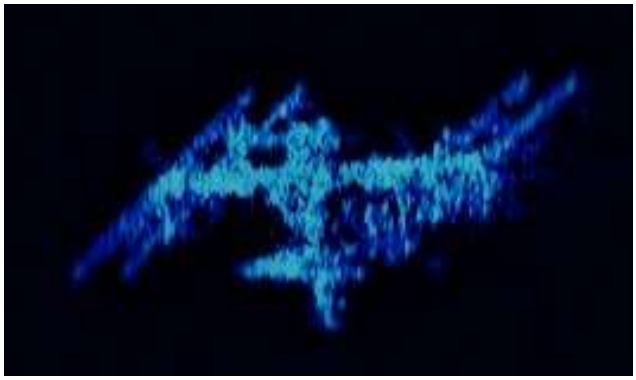


Рис. 5. РЛИ МКС, маршрутный режим

Впервые получены радиолокационные изображения КА Starlink V.2 mini (рис. 6, 7). Разработанная аппаратура и СПО ВРЛК обеспечили получение РЛИ малозаметных объектов, типа Starlink V.2 mini, основная поверхность которых состоит из АФАР и солнечных батарей, являющихся поглотителями СВЧ излучения. Следует отметить, что получение РЛИ Starlink V.2 mini было выполнено в режиме реального времени.



Рис. 6. РЛИ Starlink V.2 mini, детальный режим

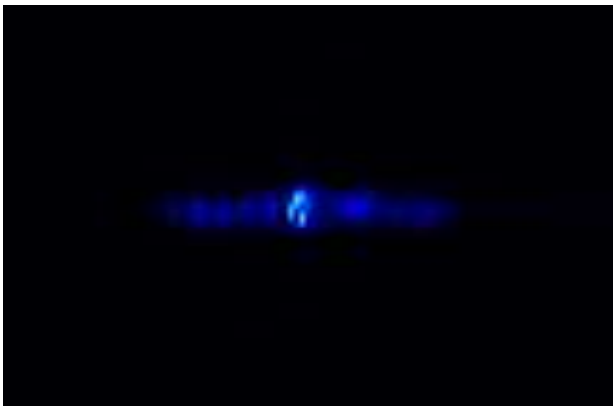


Рис. 7. РЛИ Starlink V.2 mini, маршрутный режим

На штатных значениях наклонной дальности ~1000 км получены радиолокационные изображения калибровочных сфер COSMOS 2494 (SKRL 756) и COSMOS 2292, подтвердившие требования ТЗ по радиометрической чувствительности ВРЛК в детальном и маршрутном режимах.

При оценке в детальном режиме по калибровочной сфере COSMOS 2493 (SKRL 756) диаметром $D \approx 0{,}7$ м получено значение радиометрической чувствительности, превышающее требование ТЗ на 3 дБ, на наклонной дальности $R \approx 950$ км (рис. 8).

При оценке в маршрутном режиме по калибровочной сфере COSMOS 2292 диаметром $D \approx 2$ м получено значение радиометрической чувствительности, превышающее требование ТЗ на 8 дБ, на наклонной дальности $R \approx 925$ км (рис. 9).



Рис. 8. РЛИ калибровочной сферы COSMOS 2493 (SKRL-756), полученное в детальном режиме, наклонная дальность $R \approx 950$ км

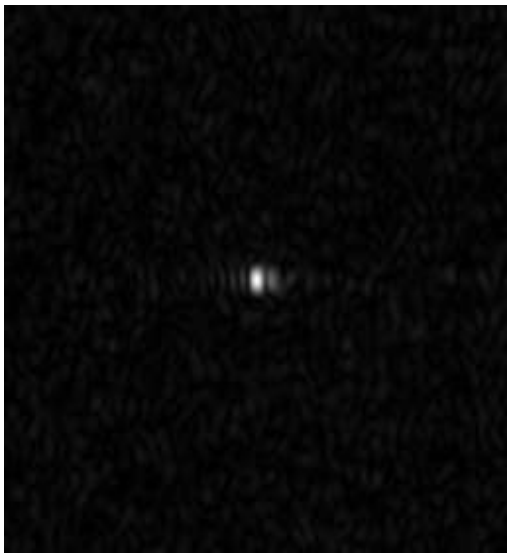


Рис. 9. РЛИ калибровочной сферы COSMOS 2292, полученное в маршрутном режиме, наклонная дальность $R \approx 925$ км

В ходе обращенного эксперимента была подтверждена помехоустойчивость ВРЛК посредством реализации 04.09.2024 г. съемки японского метеоспутника GPM (рис. 10), работающего в рабочем диапазоне частот ВРЛК. «Усы» на радиолокационном изображении являются следствием работы бортового РЛК спутника.

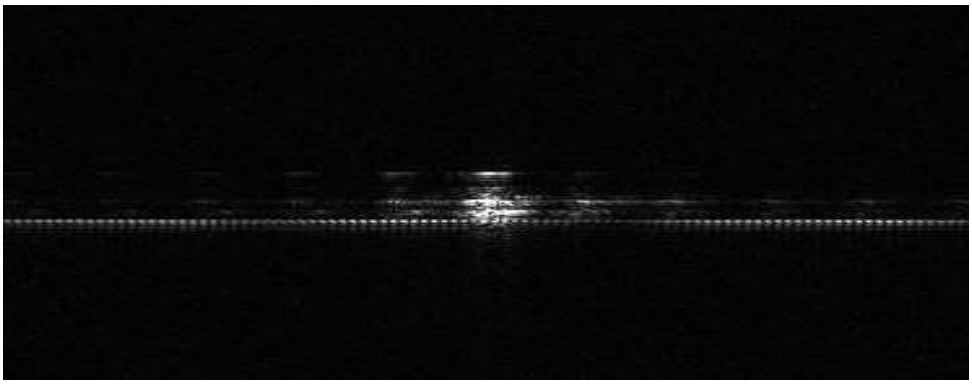


Рис. 10. РЛИ метеоспутника GPM (Япония)

Суммарный коэффициент подавления помехи составляет 53–79 дБ, что требует от наземного источника помех применения мощных станций подавления со значением *GP*помех ≈ 900 кВт.

Помехозащищенность ВРЛК обеспечивается:

– подавлением помехи при использовании сложного зондирующего ЛЧМ или ФКМ сигнала;

– формированием диаграммы направленности АФАР, обеспечивающего снижение уровня боковых лепестков или формирование нуля ДН на источник помехи;

– использованием поляризационной селекции по псевдослучайному закону.

Для обеспечения защиты ВРЛК от внешнего разрушающего воздействия мощного СВЧ излучения входные малошумящие усилители приемников АФАР изготовлены на СВЧ нитрид-галлиевых кристаллах производства АО «НПП «Пульсар», основным преимуществом которых, наряду с высокой радиационной стойкостью, является их высокая устойчивость к воздействию мощного СВЧ излучения, граница разрушения которых составляет ~50 Вт**.** В частности, для разрушения ВРЛК с поверхности Земли на дальности *R* = 1000 км необходим уровень излучения *GP*изл ≈ 20000 ГВт, что практически не реализуемо.

В ходе обращенного эксперимента также была выполнена радиолокационная съемка тандемной пары космических аппаратов TerraSAR-X/Tandem-X, выполняющей бистатическую съемку поверхности Земли (рис. 11).



Рис. 11. Тандемная пара TerraSAR-X/Tandem-X

Задачи испытаний методом обращенного эксперимента могут быть реализованы как на штатном, так и на отработочном комплекте ВРЛК, содержащем сокращенный состав активных сегментов АФАР (рис. 12–14).



*Рис. 12. Полноразмерная АФАР (5.7*1.4 м; 1280 ППМ)*



*Рис. 13. 2/5 полноразмерной АФАР (2.28*1.4 м; 512 ППМ)*



*Рис. 14. 1/5 полноразмерной АФАР (1.14*1.4 м; 256 ППМ)*

Следует отметить, что сокращенный состав АФАР отработочного комплекта ВРЛК влияет только на энергетические характеристики зондирующего излучения, что учитывается при определении параметров режима съемки орбитального объекта-мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод обращенного эксперимента позволяет провести проверку на Земле в условиях, приближенных к штатным (дальность до объекта, скорость объекта, углы сканирования, диапазон изменения ЭПР), сквозного радиотехнического и информационного трактов ВРЛК, осуществить оценку радиометрических характеристик и характеристик пространственного разрешения на этапе комплексных отработочных испытаний.

АО «НПП «Пульсар» в ходе комплексных отработочных испытаний ВРЛК выполнено более 400 сеансов радиолокационной съемки по различным космическим объектам, в том числе, впервые получены радиолокационные изображения КА Starlink V.2 mini и тандемной пары космических аппаратов TerraSAR-X/Tandem-X, выполняющей бистатическую съемку поверхности Земли.

Получены радиолокационные снимки МКС на штатных значениях наклонной дальности 600–1000 км с разрешением по дальности и азимуту, превышающими требования ТЗ, и с радиометрической чувствительностью, превышающей требования ТЗ на 3–8 дБ. Полученные результаты не уступают лучшим зарубежным аналогам.

Проведенный анализ помехозащищенности ВЛРК показал высокий уровень устойчивости ВРЛК к широкополосным помеховым сигналам и высокую защищенность от внешнего разрушающего воздействия мощного СВЧ излучения, что обеспечивается использованием нитрид-галлиевых СВЧ транзисторов производства АО «НПП «Пульсар».

Включение обращенного эксперимента в состав комплекса наземных испытаний позволяет обеспечить возможность корректировки реализованных технических и проектных реше-

ний непосредственно на испытываемом комплекте бортовой аппаратуры до проведения летных испытаний.

Одной из наиболее целесообразных мер по совершенствованию технологии обращенного эксперимента предлагается установка полотна АФАР на механическую поворотную двухкоординатную платформу. Поворотная платформа позволит расширить угловой диапазон наблюдения объектов, что приведет к возможности формирования нескольких отдельных РЛИ в ходе одной проводки с равной разрешающей способностью по продольной и поперечной координатам.

Совместная обработка серии парциальных РЛИ позволит увеличить отношение сигнал/шум суммарного РЛИ и «оконтурить» объект с улучшенными показателями.

Список использованных источников

1. Международная космическая станция // РКК «Энергия» : сайт. – URL : https://www.energia.ru/ru/iss/iss.html (дата обращения: 26.03.2025).

2. *Кребс Гюнтер Д.* «SKRL-756 1, 2» // Космическая страница Гюнтера : [онлайн-энциклопедия]. – URL : https://space.skyrocket.de/doc_sdat/skrl-756.htm (дата обращения: 26.03.2025).

3. *Кребс Гюнтер Д.* «Тайфун-1 / Вектор (11F633)» // Там же. – URL : https://space.skyrocket.de/doc_sdat/taifun-1.htm (дата обращения: 26.03.2025).

И. Ю. Возмищев,
кандидат технических наук;
К. С. Грязнова;
И. Г. Манухов,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ ФАЗОВЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье представлены результаты моделирования распространения когерентного оптического излучения с применением фазовых экранов, имитирующих искажающее действие случайно-неоднородной среды – турбулентной атмосферы. В качестве основного показателя уровня турбулентности атмосферы задается радиус пространственной когерентности атмосферы – показатель, характеризующий линейные размеры неоднородности показателя преломления в поперечном сечении распространяющегося пространственно ограниченного оптического излучения. Для решения задачи моделирования процесса распространения оптического излучения через атмосферу определено количество фазовых экранов, соответствующих эффективной толщине турбулентной трассы распространения. Данный подход позволяет построить адекватную модель распространения оптического излучения и получить количественные оценки качества работы наземных оптико-электронных систем, в том числе оснащенных адаптивным оптическим контуром компенсации фазовых искажений.

Ключевые слова: оптическое излучение, адаптивная оптика, радиус пространственной когерентности атмосферы, волновой фронт, фазовый экран, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

При наблюдении космических объектов оптическое излучение, проходящее через неоднородную атмосферу Земли, испытывает различные искажения фазового фронта. Близкий к плоскому волновой фронт удаленного наблюдаемого объекта на внешней границе атмосферы приобретает искажения различных масштабов по мере распространения через атмосферу к приемному телескопу. В итоге сформировать идеальное изображение объекта наблюдения не удается. Изображения близких друг к другу звезд становятся неразличимы по отдельности, снижается разрешающая способность, которая в этом случае полностью определяется радиусом пространственной когерентности атмосферы [1, 2]. Данные эффекты усложняют решение задач обнаружения, сопровождения и распознавания космических объектов наземными оптико-электронными системами (ОЭС).

Для снижения влияния турбулентной атмосферы на формирование изображений космических объектов используются методы и средства адаптивной оптики (АО) [1–5]. Для крупных астрономических обсерваторий разработаны математические модели турбулентной атмосферы для конкретных мест размещения оптических средств [6–10], позволяющие оценить эффективность внедрения различных технических решений при разработке адаптивных оптических систем (АОС). Как правило, эти модели представляют собой высотные зависимости структурной функции вариаций показателя преломления $C_n^2(z)$ на атмосферной трассе, с помощью которых рассчитываются средние значения основных параметров турбулентной атмосферы: радиуса когерентности (радиус Фрида), угла изопланатизма, постоянной времени и дисперсии углового дрожания центра тяжести изображения [1].

Особенно актуальной становится задача компьютерного моделирования (КМ) и оценивания эффективности работы телескопа с АОС на этапе его создания, на котором важным вопросом является формирование адекватных моделей атмосферной трассы для предполагаемого места расположения средства и режимов его функционирования в целом.

Для задачи разработки КМ АОС известны различные способы формирования моделей атмосферной трассы, среди которых наибольшее распространение получил подход с использованием так называемых фазовых экранов [11, 12]. Однако при сравнительном анализе свойств смоделированных фазовых экранов, а именно среднего значения размера области когерентности, наблюдается несоответствие задаваемому в качестве исходных данных радиусу пространственной когерентности атмосферы.

Целью данной работы является разработка модели турбулентной атмосферы на основе фазовых экранов, количество которых определяется характеристиками ОЭС, наличием и типом АОС, а также решаемыми с их помощью задачами моделирования.

МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ ФАЗОВЫХ ЭКРАНОВ

Получение аналитических результатов по влиянию атмосферной турбулентности на оптическое распространение возможно при использовании простой статистической модели. Однако, когда требуется рассмотреть более сложные сценарии, например, использование адаптивных оптических систем, обычно статистика скорректированных оптических полей не может быть вычислена в аналитической форме. Для математического упрощения распространенным методом является рассмотрение турбулентности как конечного числа дискретных слоев. Этот подход является общим для аналитических расчетов, компьютерного моделирования и имитации турбулентности в лабораторных условиях.

Каждый слой представляет собой единичный по амплитуде тонкий фазовый экран, представляющий собой турбулентный объем значительно большей толщины. Фазовый экран считается тонким, если его толщина намного меньше расстояния распространения после экрана.

Чтобы теоретически представить атмосферу как фазовые экраны, необходимо записать профиль турбулентности в терминах эффективного структурного параметра C_n^2, местоположения вдоль пути распространения z_i и толщины Δz_i слоя протяженности турбулентности, представленной *i*-м фазовым экраном. Значения C_n^2 выбираются так, что несколько моментов низкого порядка соответствуют слоистой модели [1]

$$\int_0^{\Delta z} C_n^2\left(z'\right)\left(z'\right)^m dz = \sum_{i=1}^{n} C_{n_i}^2 z_i^m \Delta z_i, \qquad (1)$$

где m – количество используемых фазовых экранов, $0 \le m \le 7$.

Таким образом, радиус пространственной когерентности атмосферы r_0, угол изопланатизма θ_0 и амплитудная дисперсия σ_χ^2 слоистой модели соответствуют параметрам моделируемой объемной турбулентности [1]:

$$\theta_0 = \left[2{,}91k^2\Delta z^{\frac{5}{3}}\sum_{i=1}^{n} C_{n_i}^2\left(1-\frac{z}{\Delta z}\right)^{\frac{5}{3}}\right]^{-\frac{3}{5}}; \qquad (2)$$

$$r_0 = \left[0{,}423k^2\sum_{i=1}^{n} C_{n_i}^2\left(\frac{z_i}{\Delta z}\right)\Delta z_i\right]^{-\frac{3}{5}}; \qquad (3)$$

$$\sigma_\chi^2 = 0{,}563k^{7/6}\Delta z^{5/6}\sum_{i=1}^{n} C_{n_i}^2\left(\frac{z_i}{\Delta z}\right)^{5/6}\left(1-\frac{z_i}{\Delta z}\right)^{5/6}\Delta z_i. \qquad (4)$$

Соотношения (2)–(4) могут быть использованы для определения необходимых свойств фазового экрана и его расположения вдоль трассы распространения лазерного излучения.

Изменение показателя преломления атмосферы является случайным процессом, как и длина оптического пути через нее. Следовательно, модели турбулентности дают статистические средние, такие как структурная функция и спектр мощности вариаций показателя преломления $C_n^2(z)$. Задача создания атмосферных фазовых экранов представляет собой генерирование одной конкретной реализации из случайного процесса. То есть фазовые экраны создаются путем преобразования сгенерированных компьютерным способом случайных чисел в двумерные массивы фазовых значений на сетке выборочных точек, которые имеют ту же статистику, что и фазовые вариации, вызванные турбулентностью.

Проведение исследований по оцениванию влияния атмосферной турбулентности на формирование оптического изображения наземными ОЭС возможно при использовании известных статистических моделей [1], полученных в том числе экспериментально [13]. Однако когда требуется исследовать работу более сложных средств, например, включающих в свой состав адаптивные оптические системы, работающие с лазерными опорными звездами (ЛОЗ), потребуются как разработка более сложных математических моделей с соответствующим набором исходных данных, так и реализация их в компьютерной модели.

На современном этапе численные методы исследования в области адаптивной атмосферной оптики насчитывают несколько подходов к генерации фазовых экранов. В табл. 1 дана их краткая сравнительная характеристика.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов генерации фазовых экранов

Метод	Уровень сложности	Точность воспроизведения	Области применения
Спектральный синтез (на основе БПФ)	Высокий (быстрый, требует субгармоник)	Низкая	Общее моделирование распространения оптических пучков
Генерация полиномами Цернике	Низкий	Высокая для низких порядков	Описания аберраций, датчики волнового фронта, адаптивная оптика
Разложение Карунена – Лоэва	Очень высокий (численные методы)	Наилучшая (минимальная ошибка усечения)	Эталонные расчеты, задачи с предельной точностью

Как видно из табл. 1, выбор метода зависит от специфики решаемой задачи и располагаемых вычислительных ресурсов при компьютерном моделировании. Далее рассмотрен процесс генерации фазовых экранов с использованием полиномов Цернике.

МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ФАЗОВЫХ ЭКРАНОВ ПОЛИНОМАМИ ЦЕРНИКЕ

В настоящем разделе рассмотрен метод полиномов Цернике для моделирования турбулентности и вариант его реализации в компьютерной вычислительной среде. Применительно к задачам адаптивной оптики, особенно когда речь идет о коррекции искажений на круглой апертуре телескопа, этот метод предполагает моделирование волнового фронта в виде суммы отдельных оптических аберраций, имеющих конкретный физический смысл. При этом полиномы Цернике обладают тремя ключевыми свойствами, делающими их удобными для рассматриваемой задачи:

– ортогональностью на круге, что соответствует форме входного зрачка телескопа;

– способностью каждого полинома описывать конкретную аберрацию – наклон, фокус, астигматизм, кому и т. д.;

– статистической независимостью: в случае турбулентности Колмогорова коэффициенты разложения по полиномам Цернике являются некоррелированными случайными величинами, что упрощает генерацию фазовых экранов.

Волновой фронт $\varphi(r,\theta)$ на апертуре радиусом R раскладывается в ряд

$$\varphi(r,\theta)=\sum_{j=1}^{\infty}a_j Z_j\left(\frac{r}{R},\theta\right), \qquad (5)$$

где Z_j – полиномы Цернике (чаще используется нумерация Нолла);

a_j – коэффициенты полиномов, значения которых задают вклад каждой из них в генерируемый общий волновой фронт. Статистика значений этих коэффициентов известна по работе [14].

Общий подход к компьютерному моделированию формирования оптического изображения через турбулентную атмосферу с использованием фазового экрана рассмотрен на примере моделирования работы простой оптической схемы «источник излучения – среда распространения – плоскость изображений», которую впоследствии можно с учетом необходимых доработок распространить на любую наземную ОЭС, в том числе оснащенную контуром АОС. На рис. 1 представлен сценарий моделирования.

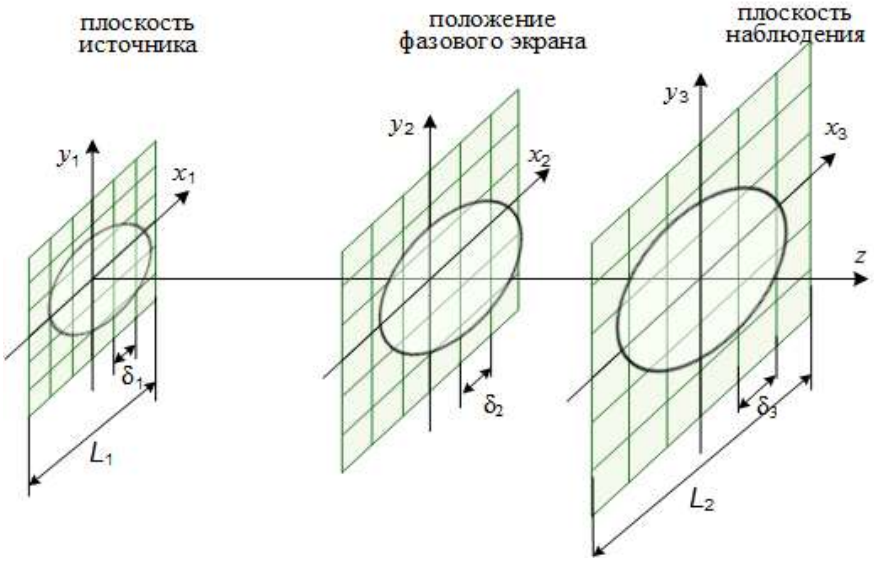


Рис. 1. Общая оптическая схема моделирования распространения оптического излучения от источника через среду распространения до плоскости наблюдения

Современные программные средства моделирования (в частности MATLAB) позволяют провести моделирование атмосферной турбулентности с использованием фазовых экранов с достаточно точными результатами. Плоскость источника излучения, плоскость наблюдения и фазовый экран задаются матрицами равных размерностей $N\times N$, соответствующим шагом сетки δ, физическим размером стороны $L = N\times\delta$, значениями интенсивности и фазы в каждом узле. Излучающая поверхность источника занимает некоторое количество узлов сетки в плоскости наблюдения. Например, для излучающей плоскости в виде диска диаметром D значения в узлах, не принадлежащих плоскости излучения, задаются нулевыми. Результатом моделирования будет являться распределение амплитуды и фазы в узлах сетки плоскости наблюдения.

Процесс генерации динамического фазового экрана включает следующие этапы.

Этап 1. Выбор базиса: определяется максимальный номер полинома J (в зависимости от решаемой задачи и начальных условий).

Этап 2. Генерация коэффициентов: формируется вектор случайных чисел $\{a_1, a_2, ..., a_J\}$ с ковариационной матрицей, соответствующей теории Нолла.

Этап 3. Синтез фазового экрана: для каждой точки апертуры или области интереса, ограниченной координатами (x, y) вычисляется значение фазы как взвешенная сумма полиномов

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^{J} a_j Z_j (x, y). \quad (6)$$

Этап 4. Моделирование изменения турбулентности во времени (ветровой снос или наблюдение космических аппаратов): формируются временные ряды коэффициентов $a_j(t)$ как коррелированный случайный процесс (например, авторегрессия первого порядка) либо формируется экран с заведомо большим размером.

Реализации случайных атмосферных фазовых экранов показаны на рис. 2.

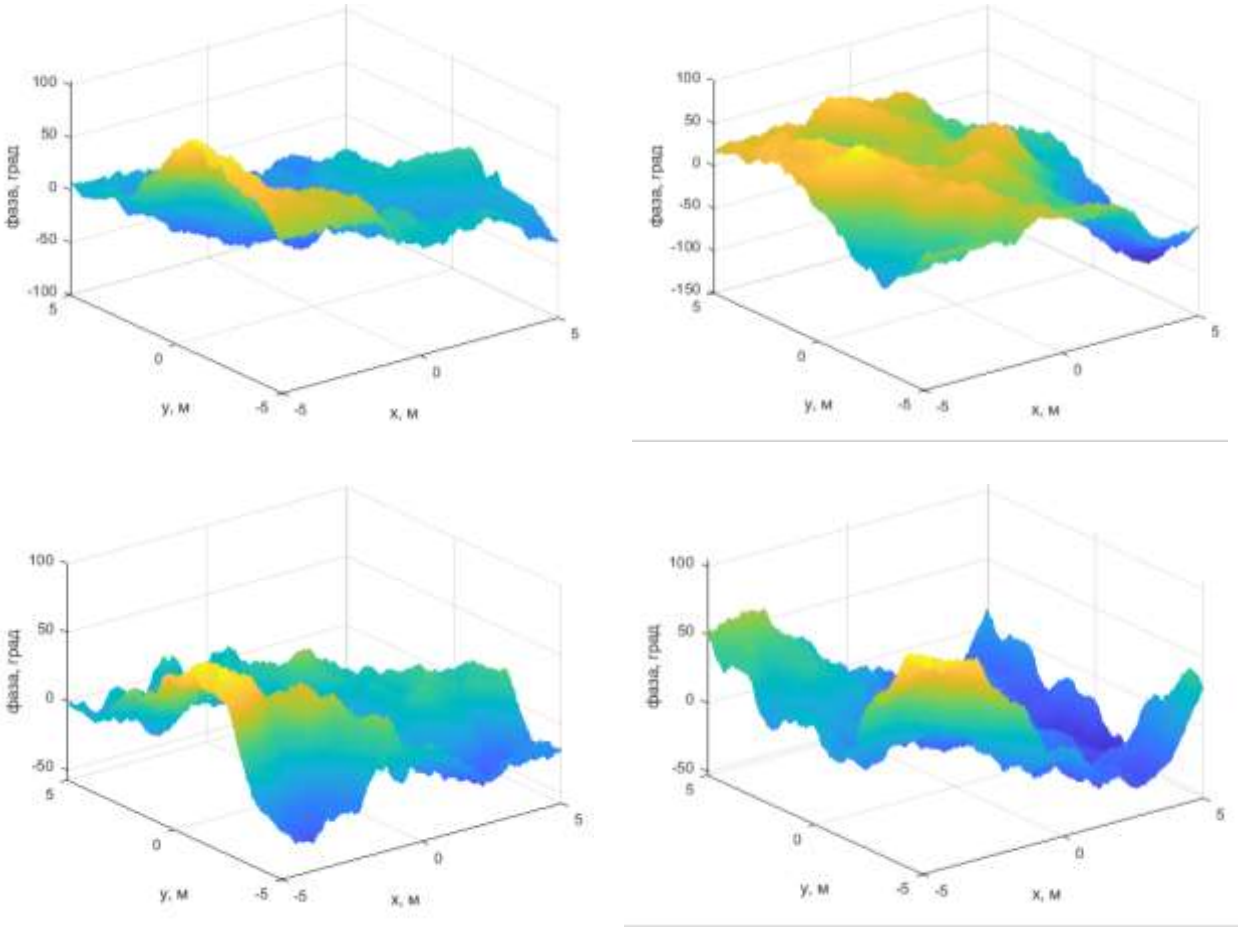
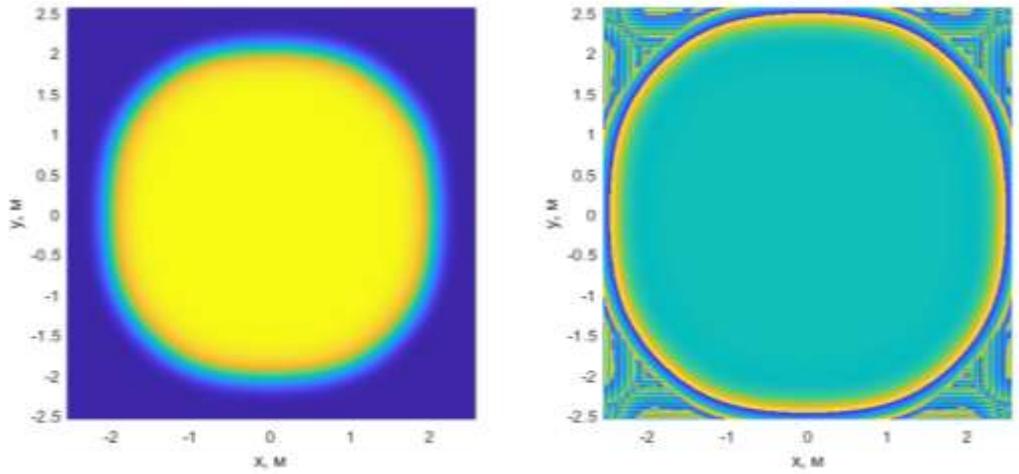


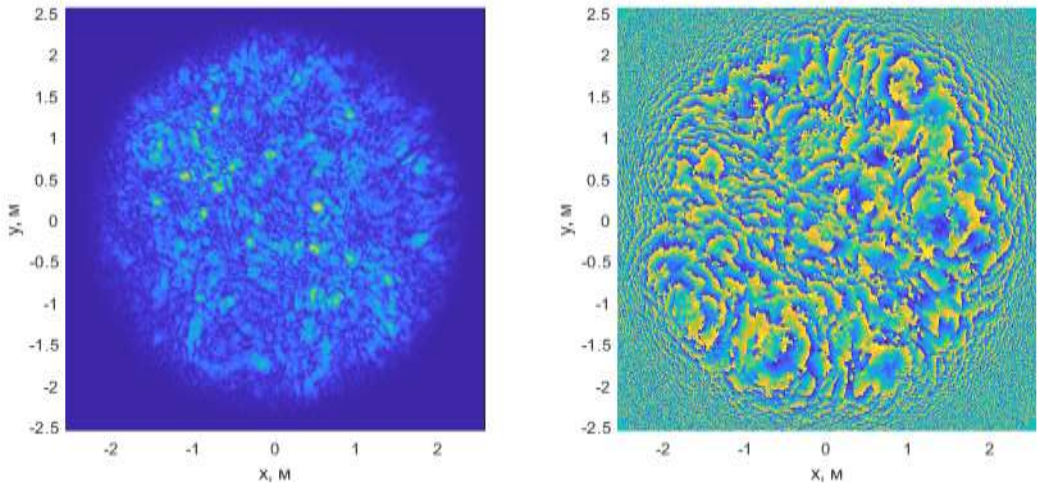
Рис. 2. Реализации случайных атмосферных фазовых экранов, созданных с помощью полиномов Цернике

Далее для сравнения смоделировано распространение пучка лазерного излучения в вакууме (рис. 3) и в турбулентной среде (рис. 4). При моделировании турбулентной среды распространения оптического излучения построено пять фазовых экранов, чтобы создать одну реализацию турбулентной среды и имитировать распространение пучка оптического излучения. При такой реализации необходимо оценивать фазовые искажения в каждый момент времени наблюдения, что обусловливает необходимость проведения имитационного моделирования турбулентной среды.



а) б)

Рис. 3. Интенсивность излучения (а) и фаза (б) в результате распространения оптического излучения от точечного источника в вакууме



а) б)

Рис. 4. Интенсивность излучения (а) и фазовый профиль (б) в результате распространения оптического излучения от точечного источника в турбулентной среде

Таким образом, моделирование фазовых экранов является достоверным способом исследования эффективности работы адаптивных оптических систем, который позволяет анализировать возможности адаптивной оптики по коррекции атмосферных искажений в динамически изменяющихся условиях наблюдения космических объектов или подвижных объектов с высокими угловыми скоростями, например, низкоорбитальных космических аппаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен подход к моделированию турбулентной среды распространения когерентного оптического излучения путем формирования нескольких фазовых экранов. Описанный подход позволяет с помощью компьютерного моделирования оценить влияние атмосферы Земли на амплитудно-фазовое распределение пучка когерентного излучения после его прохождения атмосферной трассы.

Представленный подход позволяет исследовать влияние турбулентной атмосферной трассы на распространение когерентного оптического излучения с целью оценки эффективности работы наземных ОЭС, в том числе оснащенных адаптивной оптической системой.

При наблюдении под большими зенитными углами возникает эффект высокоинтенсивной турбулентности, и в этих условиях волновой фронт перестает быть гладким – в нем появляются сингулярности (оптические вихри). Это приводит к тому, что стандартное разложение по гладким полиномам Цернике описывает волновой фронт с разрывами фазы вдоль луча и возникает дополнительная ошибка коррекции. Поэтому дальнейшие исследования направлены на разработку методов, которые уменьшают эту ошибку при сильных искажениях, например, рассматривается метод Цернике с динамически меняющимся количеством фазовых экранов в зависимости от рабочего зенитного угла визирования оптической оси наземной ОЭС.

Список использованных источников

1. *Лукин В. П.* Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск : Наука, 1986. – 250 с.

2. *Шанин О. И.* Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. – М. : Техносфера, 2013. – 295 с.

3. *Лукьянов Д. П., Корниенко А. А., Рудницкий Б. Е.* Оптические адаптивные системы / под ред. Д. П. Лукьянова. – М. : Радио и связь, 1989. – 240 с.

4. *Клеймёнов В.В., Новикова Е.В.* Эффективность применения моностатической и бистатической схем формирования лазерных опорных звезд // Оптический журнал. – 2022. – № 11. – С. 24–31.

5. *Лукин В. П.* Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физ. наук. – 2014. – Т. 184, № 6. – С. 599–640.

6. *Свиридов К. Н.* Технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. – М. : Знание, 2005. – 452 с.

7. *Манухов И. Г.* Модель измерительного канала «Квантово-оптическая система – искусственный спутник Земли» // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. – 2024. – № 1. – С. 81–86.

8. *Клеймёнов В. В., Возмищев И. Ю., Новикова Е. В.* Эффективность применения моностатической и бистатической схем формирования лазерных опорных звезд // Оптический журнал. – 2022. – № 11. – С. 24–31.

9. Практические рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов / В. В. Носов [и др.] // Солнечно-земная физика. – 2011. – Вып. 18. – С. 86–97.

10. *Fried J., Jason D. Schmidt* Numerical Simulation of Optical Wave Propagation. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010. – 199 p.

11. *Лукин В. П., Фортес Б. В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. – Новосибирск : Изд-во СОРАН, 1999. – 314 с.

12. *Мосягин Г. М.* Теория оптико-электронных систем : учеб. пособие / под ред. В. Я. Колючкина. – М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.

13. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А. С. Гурвич [и др.]. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

14. *Kanev F. Y., Makenova N. A., Veretekhin I. D.* Development of singular points in a beam passed phase screen simulating atmospheric turbulence and precision of such a screen approximation by Zernike polynomials // Photonics. – 2022. – Vol. 9, iss. 56. – P. 285–299.

В. В. Вознюк,
кандидат технических наук, доцент;
А. Г. Маслик

АЛГОРИТМ МОДИФИКАЦИИ ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ЕГО АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

В работе рассматривается актуальная задача синтеза широкополосных сигналов с заданными корреляционными свойствами. Высокий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции хаотических и псевдослучайных сигналов является существенным недостатком, ограничивающим их применение в высокоточных радиолокационных, навигационных и телекоммуникационных системах, так как это приводит к снижению разрешающей способности и увеличению вероятности ложных обнаружений. Предложен оригинальный алгоритм итерационной модификации структуры сигнала, основанный на градиентном спуске в многомерном пространстве. Алгоритм направлен на одновременную максимизацию двух целевых отношений: пикового отношения главный лепесток/боковые лепестки и энергетического отношения главный лепесток/боковые лепестки. Для решения задачи используется численное вычисление градиента целевых функций методом конечных разностей и адаптивное правило модификации амплитуд отсчетов сигнала с коэффициентом пропорциональности.

Показано, что в результате модификации исходного хаотического сигнала достигается значительное подавление уровня боковых лепестков: отношение пикового значения главного лепестка к максимальному боковому и к среднему уровню увеличивается в несколько раз. Важным достоинством алгоритма является сохранение статистических свойств исходного сигнала, что подтверждается анализом гистограмм распределения амплитуд. Разработанный подход представляет интерес для задач проектирования новых классов сигналов с улучшенными корреляционными свойствами.

Ключевые слова: автокорреляционная функция, боковые лепестки, модификация сигналов, градиентный спуск, метод конечных разностей, пик-фактор, цифровая обработка сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных радиотехнических систем (РТС), таких как радиолокационные станции, системы связи и навигации, предъявляет повышенные требования к используемым сигналам. Одной из ключевых характеристик, определяющих качество работы РТС, являются корреляционные свойства сигналов [1]. Идеальный с точки зрения теории сигнал должен обладать автокорреляционной функцией (АКФ), аппроксимирующей дельта-функцию: острый центральный (главный) лепесток и минимально возможный уровень боковых лепестков (БЛ) во всей остальной области [2]. Высокий главный лепесток обеспечивает большое отношение сигнал/шум и точность измерения задержки, а низкий уровень БЛ минимизирует взаимные помехи между объектами, расположенными на разных дальностях, и снижает вероятность ложных обнаружений.

Для решения данной задачи применялись детерминированные последовательности с отличными корреляционными свойствами, такие как последовательности Баркера, коды Голда, М-последовательности [3]. Однако их возможности ограничены: длина последовательностей Баркера не превышает 13 чипов, а другие последовательности часто демонстрируют приемлемый уровень БЛ только в усредненном смысле, а не при каждом значении задержки сигнала.

Альтернативным подходом является использование псевдослучайных и хаотических сигналов, моделируемых стационарными случайными процессами. Данное предположение о стационарности является фундаментальным для корректного определения и анализа автокорреляционной функции через временное усреднение. Однако данные сигналы в своем исходном виде (например, гауссовский «белый шум») также обладают неидеальной АКФ со значительным уровнем БЛ.

Таким образом, актуальной является задача целенаправленной модификации исходного хаотического сигнала для придания ему требуемых корреляционных свойств. Данная работа посвящена разработке и исследованию алгоритма двухкритериальной модификации формы сигнала, направленного на подавление уровня БЛ его АКФ.

Цель работы – разработка и верификация алгоритма итерационной модификации отсчетов хаотического сигнала, обеспечивающего одновременное увеличение отношений главный лепесток/боковые лепестки (пикового и энергетического) его АКФ при сохранении статистических свойств исходного стационарного случайного процесса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть задан хаотический сигнал конечной длины в дискретной форме, представленный вектором своих отсчетов,

$$X = \left[x_1, x_2, ..., x_N\right]^T, \tag{1}$$

где N – длина выборки сигнала;

x_i – отсчеты сигнала, представляющие собой реализации стационарного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием $m_X = M\left[X, N\right] = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$ и конечной дисперсией $\sigma_X^2 = D\left[X, N\right] = M\left[\left(X - m_X\right)^2, N\right] = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - m_X\right)^2$.

Предположение о стационарности случайного процесса позволяет использовать следующее определение АКФ:

$$R_k\left(X\right) = M\left[\left(X_1^J - m_X\right)\left(X_{1+k}^{J+k} - m_X\right), J\right] = \frac{1}{N-k}\sum_{i=1}^{N-k} x_i \cdot x_{i+k},$$
$$R\left(X\right) = \left\{R_k\left(X\right), k = 0...J\right\} \tag{2}$$

где k – параметр временного сдвига, $k = 0, 1, ..., J$,

J – максимальный рассматриваемый временной сдвиг, $J = \lfloor N/2 \rfloor$,

$R(X)$ – вектор значений АКФ исходного хаотического сигнала X.

С теоретической точки зрения, для идеального некоррелированного сигнала X^* АКФ должна приближаться к дельта-функции:

$$R_k\left(X^*\right) = \begin{cases} \sigma_{X^*}^2 \delta\left(k\right), k = 0; \\ 0, \quad k \neq 0. \end{cases}$$

Однако создание идеального ансамбля хаотических сигналов, АКФ которого в точности соответствует дельта-функции, представляет собой сложную научную проблему. В реальных условиях сигналы имеют конечную длительность (ограниченную выборку), что неизбежно приводит к наличию БЛ АКФ. Даже для наиболее перспективных классов хаотических сигналов, таких как гауссовский «белый шум», при конечном числе отсчетов N автокорреляционная функция существенно отличается от идеальной. Ограниченность по времени (выборке) и дискретность сигнала приводят к неизбежному появлению БЛ АКФ, которые также как и сигнал носят псевдослучайный характер.

Учитывая указанные особенности АКФ хаотических сигналов, для практической оценки их качества необходимо ввести количественные меры, характеризующие уровень БЛ АКФ. В данной работе предложены два ключевых показателя, которые комплексно оценивают отклонение реальной АКФ от идеальной:

1) максимальное значение уровня боковых лепестков

$$F_1(X) = \max_{k\in\{1\ldots M\}} \left|R_k\left(X\right)\right|; \tag{3}$$

2) среднеквадратичный уровень боковых лепестков

$$F_2(X) = D\left[R\left(X\right), J\right] = \sqrt{\frac{1}{J}\sum_{k=1}^{J}\left(R_k(X) - M\left[R\left(X\right), J\right]\right)^2}, \tag{4}$$

где $M\left[R(X), J\right]$ – среднее значение боковых лепестков АКФ хаотического сигнала X, $M\left[R(X), J\right] = \frac{1}{J}\sum_{k=1}^{J} R_k(X)$.

Данные показатели позволяют количественно оценить как локальные (пиковые), так и интегральные (среднеквадратичные) отклонения АКФ от идеальной формы и служат основой для разработки методов синтеза и модификации хаотических сигналов.

Процесс синтеза хаотического сигнала с минимальным уровнем БЛ АКФ сводится к необходимости решения двухкритериальной задачи модификации исходного (заданного) хаотического сигнала с целью минимизации уровня его БЛ по приведенным выше показателям [4].

Содержательная формулировка задачи синтеза хаотического сигнала с минимальным уровнем БЛ АКФ состоит в следующем.

Требуется найти такой вектор X^*, который получен путем многократного ($q = 0,1,\ldots$) применения оператора преобразования $X^{\langle q+1\rangle} = \Lambda\left(X^q\right) = \Lambda^{q+1}\left(X\right)$ исходного вектора X, основанного на алгоритме модификации, обеспечивающего минимум одновременно двум целевым показателям (3) и (4). Необходимо отметить, что нулевой этап модификации совпадает с исходным вектором, т. е. $X = X^{\langle 0\rangle} = \Lambda^0\left(X\right)$. Под оператором преобразования $\Lambda(\ldots)$ понимается алгоритм целенаправленного увеличения или уменьшения с переменным шагом каждого отсчета исходного вектора $X^{\langle q\rangle}$ с целью достижения критерия

$$X^{\langle q+1\rangle} = \left\{\Lambda\left(X^q\right) : F_1\left(\Lambda\left(X^q\right)\right) \le F_1\left(X^{\langle q\rangle}\right) \cap F_2\left(\Lambda\left(X^q\right)\right) \le F_2\left(X^{\langle q\rangle}\right)\right\}, \tag{5}$$

где q – номер этапа модификации, при соблюдении следующих ограничений:

1) сохранения дисперсии хаотического сигнала $X^{\langle q\rangle}$

$$D\left[X^{\langle q+1\rangle}, N\right] = D\left[X^{\langle q\rangle}, N\right] = \sigma_0^2, \tag{6}$$

где σ_0^2 – исходная дисперсия сигнала;

2) сохранения нулевого математического ожидания

$$M\left[X^{\langle q+1\rangle}, N\right] = 0. \tag{7}$$

Для придания физического смысла задаче (5) и соответствия общепринятой в радиотехнике терминологии осуществим переход к эквивалентной формулировке задачи через отношение сигнал/шум. Для оценки результативности каждого этапа модификации сигнала вводятся два альтернативных показателя, рассчитываемых на основе значений (3) и (4):

1) отношение значения центрального пика АКФ к максимальному значению боковых лепестков (пиковое отношение сигнал-шум)

$$V_1\left(X\right) = \frac{R_0(X)}{F_1(X)}; \tag{8}$$

2) отношение значения центрального пика АКФ к СКО боковых лепестков (среднеквадратичное отношение сигнал/шум)

$$V_2(X) = \frac{R_0(X)}{F_2(X)}. \quad (9)$$

Показатели $V_1(X)$ и $V_2(X)$ имеют ясный физический смысл – они характеризуют степень превышения значения главного лепестка АКФ над соответствующими уровнями БЛ. Увеличение этих отношений соответствует улучшению автокорреляционных свойств сигнала. Данный подход согласуется с общепринятой в радиотехнике практикой использования отношений сигнал/шум для оценки качества систем.

Исходная задача минимизации показателей $F_1(X)$ и $F_2(X)$ эквивалентна задаче максимизации показателей$V_1(X)$ и $V_2(X)$, что обеспечивает более естественную интерпретацию результатов модификации и соответствует принципам оценки результативности в радиотехнических системах. Формально альтернативная задача модификации может быть записана в виде

$$X^{\langle q+1\rangle} = \left\{\Lambda\left(X^q\right) : V_1\left(\Lambda\left(X^q\right)\right) \geq V_1\left(X^{\langle q\rangle}\right) \cap V_2\left(\Lambda\left(X^q\right)\right) \geq V_2\left(X^{\langle q\rangle}\right)\right\} \quad (10)$$

при ранее указанных ограничениях (6) и (7).

Таким образом, сформулированная задача является двухкритериальной задачей последовательного поиска лучших вариантов модифицированных хаотических сигналов, так как требует максимизации двух неявно связанных показателей с заданными ограничениями. При этом рассмотренный ранее алгоритм модификации гарантирует сохранение хаотической природы модифицированных сигналов.

Объект модификации имеет высокую размерность, что исключает возможность применения методов полного перебора и требует использования методов направленного поиска решений, основанных на вычислении градиентов отсчетов хаотических сигналов.

Основная идея предложенного алгоритма модификации хаотического сигнала заключается в последовательном анализе каждого отсчета на предмет его влияния на целевые показатели $V_1(X)$ и $V_2(X)$ и использования полученной информации для последующего изменения этого отсчета. Для каждого отсчета $x_i \in X$ оценивается градиент (направление и степень) его влияния на оба показателя качества. Формируется множество отсчетов, подлежащих изменению, характер которого определяется знаком и величиной соответствующего градиента. Те отсчеты, которые характеризуются положительным градиентом делятся на коэффициент модификации d, а отсчеты с отрицательным градиентом умножаются на этот же коэффициент. Значение данного коэффициента модификации d в первом цикле решения задачи (10) принимает свое максимальное значение d = 1,5. На последующих циклах решения задачи (10) он может уменьшаться вплоть до минимально возможного значения d = 1,01. Переход от максимального значения d на первом цикле к его меньшим значениям на последующих циклах позволяет последовательно улучшать качество хаотического сигнала без существенных затрат машинного времени.

АЛГОРИТМ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Для решения поставленной задачи двухкритериальной модификации хаотического сигнала разработан итерационный алгоритм, основанный на градиентном подходе с сохранением основных статистических характеристик сигнала. Общая схема алгоритма представлена на рис. 1 и включает следующие основные этапы:

1) инициализацию (формирование) исходного хаотического сигнала;
2) вычисление автокорреляционной функции исходного хаотического сигнала;
3) оценку показателей качества исходного хаотического сигнала;

4) вычисление градиента чувствительности отсчетов исходного хаотического сигнала по отношению к каждому из рассматриваемых показателей;

5) модификацию отсчетов сигнала;

6) коррекцию статистических характеристик и проверка выполнения условий ограничений.

7) итерационную процедуру, включающую последовательное выполнение шагов 2–6 и проверка условий ее остановки.

Данный подход обеспечивает направленное улучшение автокорреляционных свойств сигнала при сохранении его хаотической природы и статистических характеристик, что является ключевым требованием для практического применения алгоритма.

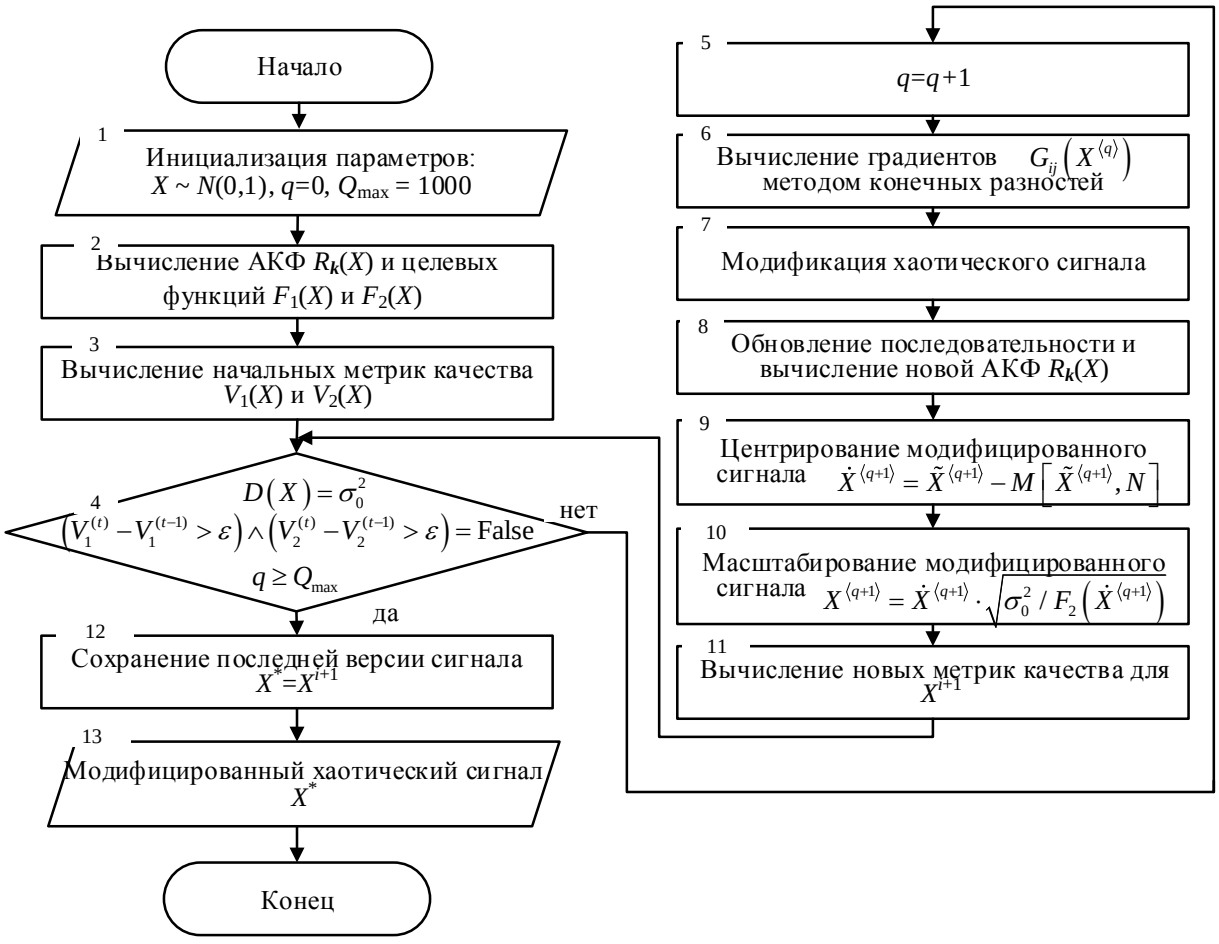


Рис. 1. Блок-схема алгоритма модификации параметров хаотического сигнала в интересах обеспечения минимального уровня боковых лепестков его АКФ

Предложенный алгоритм состоит из пяти основных шагов, реализованных итеративно. В качестве целевых функций модификации используются отношение значения центрального пика АКФ к максимальному значению БЛ $V_1(X)$ (8) и отношение значения центрального пика АКФ к СКО БЛ $V_2(X)$ (9), характеризующие качество автокорреляционной функции.

Шаг 1. Расчет автокорреляционной функции.

Для анализа корреляционных свойств сигнала используется оценка автокорреляционной функции, вычисляемая согласно выражению (2).

Шаг 2. Вычисление градиента показателей качества хаотического сигнала.

Для определения направления модификации сигнала вводится функция чувствительности, оценивающая влияние каждого отсчета на показатели качества. Такая функция вычисляется на основе оценки значения градиента следующего вида:

$$G_{ij}(X^{\langle q\rangle}) = \frac{\partial V_j(X_i^{\langle q\rangle})}{\partial X_i^{\langle q\rangle}} \approx \frac{V_j\left(X_i^{\langle q\rangle} + \Delta\right) - V_j\left(X_i^{\langle q\rangle}\right)}{\Delta},\ q = 0,1,2,... \tag{11}$$

где Δ – малое приращение, $\Delta = \max\left|X_i^{\langle q\rangle}\right| / 200$;

j – номер показателя оптимизации, j = 1, 2.

Для каждого i-го отсчета сигнала X вычисляется его влияние на целевые функционалы $V_1\left(X_i^{\langle q\rangle}\right)$ и $V_2\left(X_i^{\langle q\rangle}\right)$. Формируется модифицированный сигнал $X_{i+1}^{\langle q\rangle}$. Для модифицированного сигнала, в котором только i-й отсчет изменен, заново рассчитываются АКФ и новые значения $V_1'\left(X_i^{\langle q\rangle}\right)$ и $V_2'\left(X_i^{\langle q\rangle}\right)$. Результатом работы функции является матрица размерности $N\times 2$, строки которой содержат компоненты градиента для каждого отсчета сигнала. Данный подход позволяет оценить чувствительность каждого критерия к малым изменениям каждого отсчета сигнала и определить оптимальное направление модификации сигнала для улучшения его автокорреляционных свойств.

Шаг 3. Процедура модификации сигнала.

Модификация сигнала на каждой итерации происходит по эвристическому правилу, нацеленному на одновременное улучшение обоих критериев. Для каждого i-го отсчета:

$$\tilde{X}_i^{\langle q+1\rangle} == \begin{cases} X_i^{\langle q\rangle} / d, & \text{если } G_{i1}(X^{\langle q\rangle}) > 0 \text{ и } G_{i2}(X^{\langle q\rangle}) > 0; \\ X_i^{\langle q\rangle} \cdot d, & \text{если } G_{i1}(X^{\langle q\rangle}) < 0 \text{ и } G_{i2}(X^{\langle q\rangle}) < 0; \\ X_i^{\langle q\rangle}, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \tag{12}$$

где d – эмпирически подобранный коэффициент модификации.

Если оба градиента положительны ($G_{i1}(X^{\langle q\rangle}) > 0$ и $G_{i2}(X^{\langle q\rangle}) > 0$) – увеличение отсчета привело к росту обеих целей (ухудшению качества АКФ). Следовательно, для улучшения ситуации отсчет необходимо ослабить.

Если оба градиента отрицательны $G_{i1}(X^{\langle q\rangle}) < 0$ и $G_{i2}(X^{\langle q\rangle}) < 0$) – увеличение отсчета привело к уменьшению обеих целей (улучшению качества АКФ). Следовательно, отсчет необходимо усилить.

Если знаки градиентов различны – изменение отсчета улучшает один критерий, но ухудшает другой, в таком случае отсчет не изменяется.

Шаг 4. Коррекция статистических характеристик.

После каждой итерации модификации сигнала осуществляется процедура коррекции статистических характеристик, направленная на сохранение фундаментальных свойств исходного хаотического сигнала. Данный процесс состоит из двух последовательных этапов.

Первым этапом является обеспечение нулевого математического ожидания сигнала (центрирование сигнала). После модификации отсчетов может возникать смещение среднего значения, что нарушает стационарность сигнала. Процедура центрирования выполняется согласно выражению

$$\dot{X}^{\langle q+1\rangle} = \tilde{X}^{\langle q+1\rangle} - M\left[\tilde{X}^{\langle q+1\rangle}, N\right]. \tag{13}$$

Данная операция гарантирует, что $M\left[\dot{X}^{\langle q+1\rangle}, N\right] = 0$. Это является необходимым условием для сохранения стационарности случайного процесса и обеспечения корректности последующего корреляционного анализа.

Вторым этапом является восстановление исходной дисперсии сигнала (масштабирование для сохранения дисперсии). Модификация отсчетов изменяет энергию сигнала, что недопустимо для практических применений. Масштабирование выполняется по формуле

$$X^{\langle q+1\rangle} = \dot{X}^{\langle q+1\rangle} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0^2}{F_2\left(\dot{X}^{\langle q+1\rangle}\right)}}, \tag{14}$$

где σ_0^2 – исходная дисперсия сигнала.

Данное преобразование обеспечивает выполнение условия $F_2\left(X^{\langle q+1\rangle}\right) = \sigma_0^2$, сохраняя дисперсию хаотического сигнала неизменной. Коэффициент масштабирования вычисляется как отношение исходной дисперсии к текущей, что гарантирует точное восстановление мощности. Представленная методика коррекции обеспечивает сохранение энергии сигнала в процессе модификации, что является критически важным для практической применимости предлагаемого алгоритма.

Шаг 5. Итерационная процедура.

Итерационный процесс модификации прекращается при выполнении одного из трех условий.

1. Условие остановки алгоритма на основе невозможности улучшения показателей качества.

Основным критерием остановки является невозможность дальнейшего одновременного улучшения обоих целевых показателей:

$$\text{STOP} = \begin{cases} 1, & \text{если}\left(V_1^{(q+1)}(X) - V_1^{(q)}(X) > \varepsilon\right) \wedge \left(V_2^{(q+1)}(X) - V_2^{(q)}(X) > \varepsilon\right) = \text{False}; \\ 0, & \text{в противном случае}, \end{cases} \tag{15}$$

где $V_1^{(q)}(X), V_2^{(q)}(X)$ – значения критериев качества на итерации q.

ε – пороговое значение улучшения на итерации q, $\varepsilon \in \left[10^{-4}, 10^{-6}\right]$.

Данное условие фиксирует ситуацию, когда дальнейшая оптимизация не приводит к одновременному улучшению обоих показателей $V_1^{(q)}(X)$ и $V_2^{(q)}(X)$, что свидетельствует о достижении искомого результата в многокритериальной задаче модификации.

2. Условие остановки по ограничению на максимальное число итераций.

Для обеспечения гарантированного завершения процесса даже в сложных условиях модификации для хаотических сигналов с большим количеством отсчетов сигналов вводится дополнительное условие:

$$\text{STOP} = 1, \text{ если } q \geq Q_{\max}, \tag{16}$$

где $Q_{\max}$ – максимально допустимое число итераций, $Q_{\max} = 1000$.

Для повышения надежности при работе алгоритма с большим количеством отсчетов сигнала могут быть использованы дополнительные критерии:

– критерий относительного улучшения, который обеспечивает остановку при достижении заданной точности оптимизации:

$$\text{STOP} = 1, \text{ если } \frac{\left|V_j^{(q+1)}(X) - V_j^{(q)}(X)\right|}{V_j^{(q)}(X)} < \varepsilon; \tag{17}$$

– критерий стабилизации решения, который гарантирует остановку при незначительных изменениях самого сигнала, что свидетельствует о достижении устойчивого решения:

$$\text{STOP} = 1, \text{ если } \left\| X^{(q+1)} - X^{(q)} \right\|_2 < \delta, \tag{18}$$

где δ – пороговое значение изменения сигнала, $\delta \in \left[10^{-3}, 10^{-4}\right]$.

С учетом дополнительных условий, которые гарантируют завершение вычислений за конечное время и обеспечивают остановку при незначительных изменениях самого сигнала, полное условие остановки алгоритма может быть записано следующим образом:

$$\text{STOP} = \begin{cases} & \text{если} \left[\left(V_1^{(q+1)}(X) - V_1^{(q)}(X) > \varepsilon \right) \wedge \left(V_2^{(q+1)}(X) - V_2^{(q)}(X) > \varepsilon \right) = \text{False} \right] \vee \left[q \geq Q_{\max} \right] \vee \\ 1, & \vee \left[\max_{j=1,2} \dfrac{\left| V_j^{(q+1)}(X) - V_j^{(q)}(X) \right|}{V_j^{(q)}(X)} < \varepsilon \right] \vee \left[\left\| X^{(q+1)} - X^{(q)} \right\|_2 < \delta \right]; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \tag{19}$$

Данный комплекс условий обеспечивает надежную остановку алгоритма при достижении практически оптимального решения с учетом вычислительных ограничений и требований к качеству модификации.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

В качестве исходного сигнала для модификации использовалась реализация случайного процесса, полученная с помощью датчика псевдослучайных чисел с нормальным распределением. Сигнал длиной N = 1500 отсчетов формировался последовательным применением генератора случайных чисел, обеспечивающего нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию: $X \sim N(0,1)$. Подобный подход к формированию хаотического сигнала описан в работе [2], где подчеркивается важность сохранения основных статистических свойств (математическое ожидание и дисперсия) при моделировании шума для задач цифровой обработки сигналов.

Параметры алгоритма модификации:

– коэффициент модификации d =1,5;

– максимальное число итераций $T_{\max}$ = 1000;

– критерий остановки по относительному улучшению $\varepsilon = 10^{-5}$.

Для количественной оценки эффективности алгоритма используются метрики $F_1(X)$, $F_2(X)$ и $V_1(X)$, $V_2(X)$, определяемые в соответствии с выражениями (3), (4) и (8), (9) соответственно.

В табл. 1 представлены сравнительные характеристики АКФ исходного и модифицированного сигналов.

Таблица 1

Сравнение автокорреляционных характеристик

Параметр	Исходный сигнал	Модифицированный сигнал	Улучшение
$F_1(\mathbf{m})$	0,0934	0,0415	55,6 %
$F_2(\mathbf{m})$	0,0294	0,0150	49,2 %
$V_1(\mathbf{m})$	10,29	24,12	134,5 %
$V_2(\mathbf{m})$	32,66	66,84	104,6 %

Анализ табл. 1 показывает значительное улучшение автокорреляционных характеристик хаотического сигнала после модификации. Наиболее существенное улучшение наблюдается для отношений $V_1(X)$ и $V_2(X)$ – 134,5% и 104,6% соответственно, что демонстрирует эффективность предложенного алгоритма в одновременном снижении как пикового, так и среднего уровня БЛ автокорреляционной функции.

Для компьютера с процессором Intel Core i7-9700K 3.6 ГГц алгоритм модификации показал следующие характеристики по вычислительной эффективности:

1) время выполнения: 9,7 секунд для сигнала длиной 1500 отсчетов;
2) количество итераций: 187;
3) среднее время на итерацию: 0,0518 секунды;
4) относительное улучшение на итерацию: 0,15%.

Вычислительная сложность алгоритма соответствует ожидаемой $O(N^2)$ в зависимости от длины сигнала. Количество итераций до сходимости составляет 12,5% от длины сигнала, что свидетельствует о хорошей скорости сходимости предложенного алгоритма.

На рис. 2 представлено сравнение АКФ исходного и модифицированного хаотических сигналов. У АКФ исходного сигнала при нулевом временном сдвиге наблюдается пиковое значение, равное дисперсии сигнала, а при ненулевых сдвигах значения наблюдаются характерные для белого шума флуктуации вокруг нуля. Неравномерное распределение БЛ свидетельствует о случайной природе исходного сигнала. Форма АКФ исходного сигнала подтверждает широкополосные свойства исходного сигнала и отсутствие периодических составляющих.

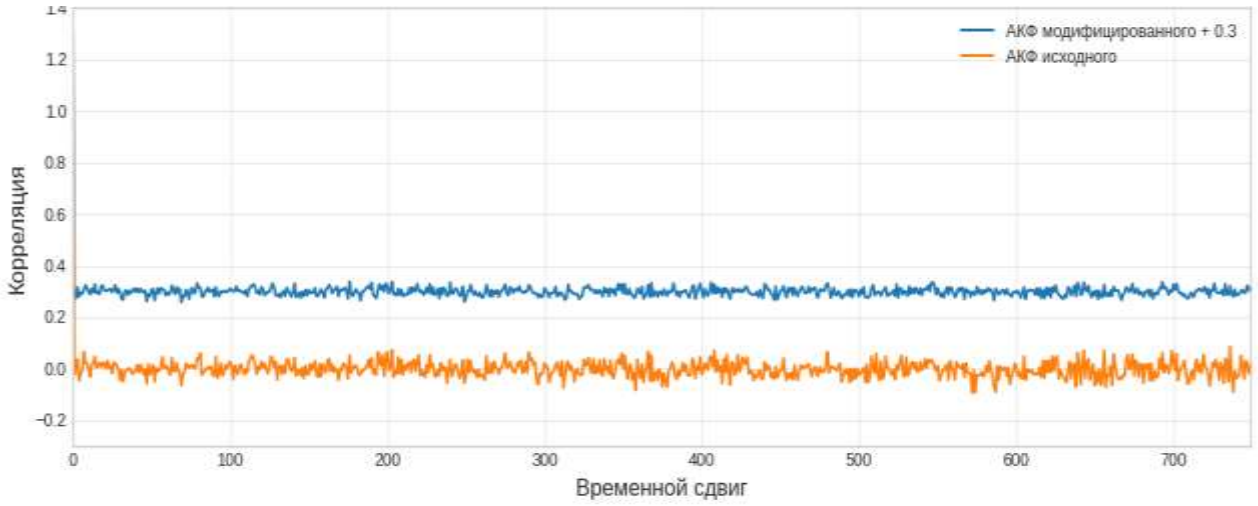


Рис. 2. Сравнение АКФ исходного и модифицированного хаотических сигналов

Для наглядности АКФ модифицированного сигнала сдвинута на 0,3 по вертикали. Наблюдается значительное снижение уровня БЛ у модифицированного сигнала. Пиковое значение БЛ уменьшилось с 0,125 до 0,087. Форма АКФ модифицированного сигнала стала более равномерной, с меньшим разбросом значений БЛ.

На рис. 3 представлены градиенты чувствительности критериев модификации к малым изменениям отсчетов сигнала. Синяя линия показывает влияние на отношение значения центрального пика АКФ к максимальному значению БЛ (пиковое отношение сигнал-шум $V_1(X)$), зеленая пунктирная линия – отношение значения центрального пика АКФ к СКО БЛ (среднеквадратичное отношение сигнал-шум $V_2(X)$), умноженное на коэффициент 8 для наглядности сравнения.

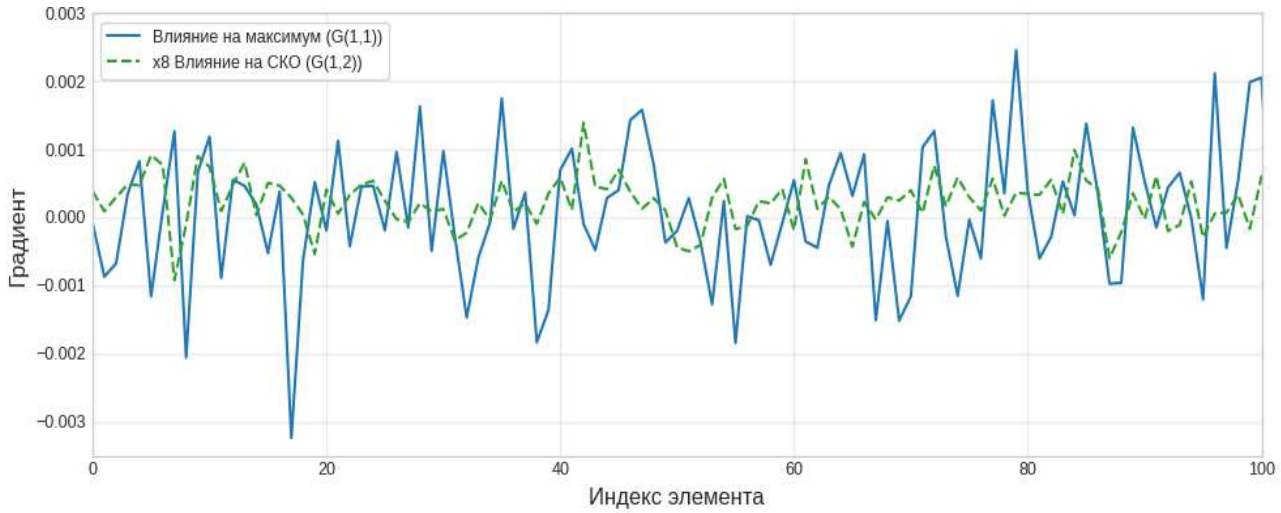


Рис. 3. Градиенты чувствительности критериев модификации к малым изменениям отсчетов сигнала

Высокая вариативность градиентов свидетельствует о нелинейном характере зависимости критериев от отдельных отсчетов. Наличие как положительных, так и отрицательных значений градиентов указывает на возможность направленной оптимизации путем модификации амплитуд соответствующих отсчетов.

Сравнение первых 100 отсчетов исходного и модифицированного сигналов (рис. 4) позволяет убедиться, что оба сигнала сохраняют характер случайного процесса с нулевым средним. Модифицированный сигнал демонстрирует измененную амплитудную структуру, что является следствием направленной модификации отсчетов для улучшения автокорреляционных свойств. При этом общий динамический диапазон и статистические характеристики сохраняются, что подтверждает эффективность процедуры коррекции дисперсии хаотического сигнала.

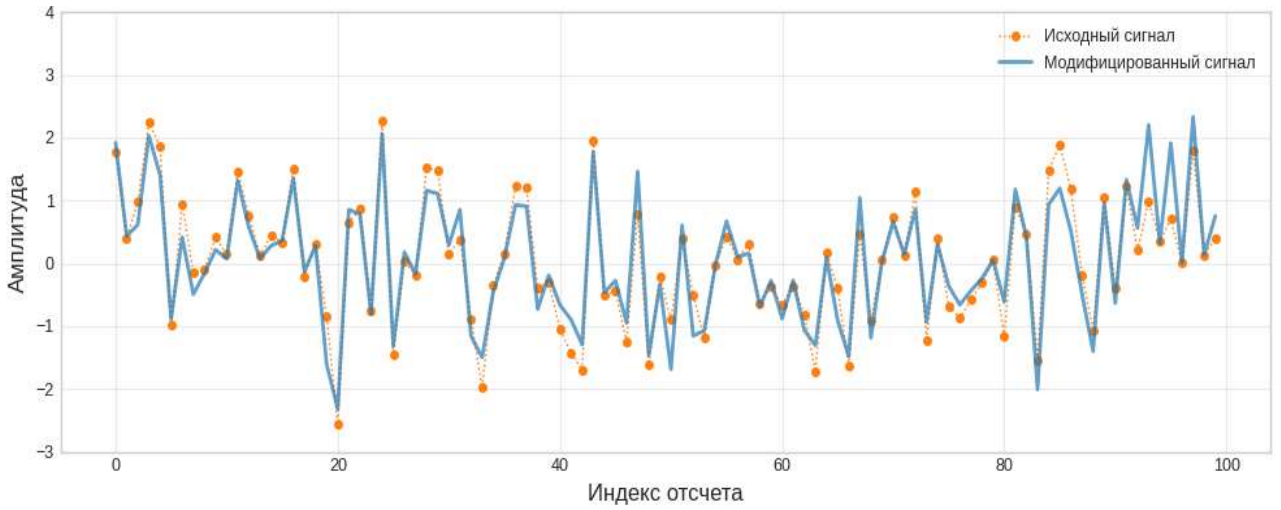
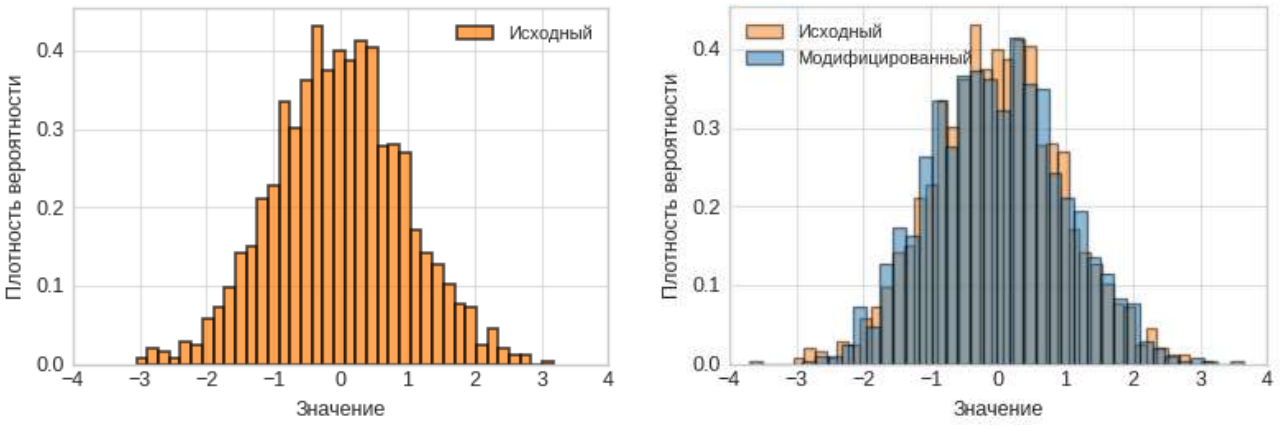


Рис. 4. Сравнение первых 100 отсчетов исходного и модифицированного сигналов

На рис. 5 представлены гистограммы распределения исходного и модифицированного хаотических сигналов. По горизонтальной оси отложены значения отсчетов сигнала, по вертикальной – частота их встречаемости.

Распределение демонстрирует характерную для гауссовского шума колоколообразную форму с центром в нуле. Ширина распределения соответствует единичной дисперсии исход-

ного сигнала. Распределение визуально соответствует нормальному закону, что подтверждает корректность генерации исходного хаотического сигнала. Гистограмма модифицированного шума, наложенная на гистограмму исходного шума, также показывает близость к нормальному распределению. Это означает, что алгоритм корректно сохраняет математическое ожидание и дисперсию, важные в задачах моделирования случайных процессов. Незначительные различия в «тяжелых хвостах» распределения модифицированного сигнала обусловлены усилением и ослаблением отдельных отсчетов в процессе модификации.



а) б)

Рис. 5. Гистограмма распределений исходного хаотического сигнала (а) и гистограмма распределений модифицированного хаотического сигнала, наложенная на гистограмму распределений исходного сигнала (б)

Для анализа влияния оптимизации на спектральные характеристики сигналов было выполнено преобразование Фурье от АКФ исходного и модифицированного сигналов. Согласно теореме Винера – Хинчина, данное преобразование дает оценку спектральной плотности мощности сигналов. На рис. 6 представлены спектры мощности, которые демонстрируют сохранение широкополосных свойств сигнала после модификации, что говорит о сохранении основных статистических свойств хаотического сигнала и его пригодности к дальнейшему использованию в реальных системах связи и радиолокации.

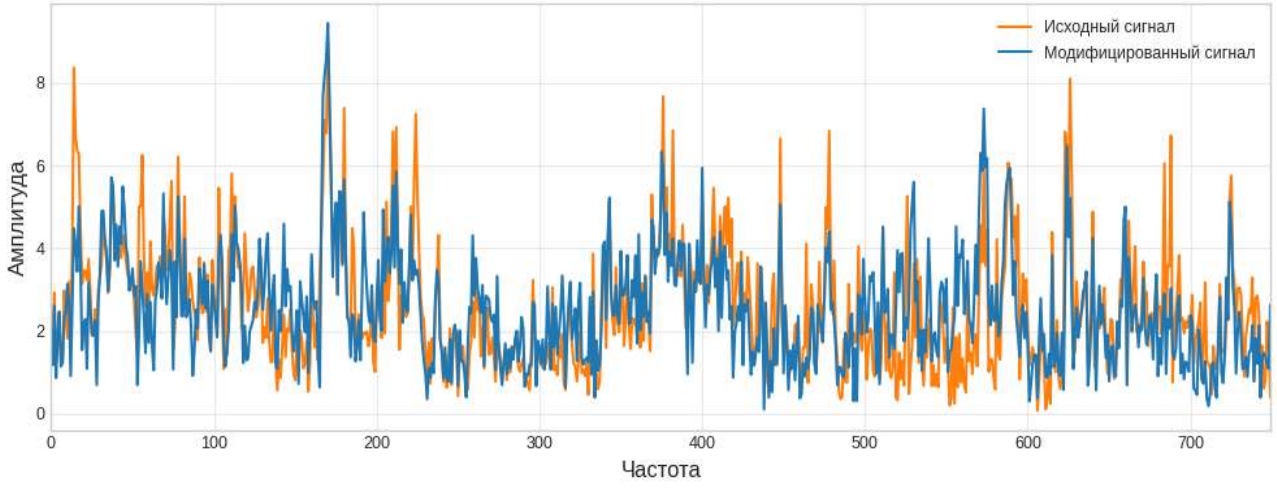


Рис. 7. Спектры мощности исходного и модифицированного сигналов

Результаты численных экспериментов подтверждают, что применение итерационного алгоритма на основе градиентного анализа позволяет уменьшить уровень БЛ АКФ без существенного искажения энергетических и статистических характеристик хаотического сигнала. Это делает данный алгоритм перспективным для использования в широком спектре приложений, основанных на использовании хаотических сигналов – от систем связи до радиолокационных комплексов [5]. Приведенные результаты экспериментов демонстрируют работоспособность и практическую пригодность разработанного подхода по модификации произвольного хаотического сигнала, позволяющего снизить уровень его БЛ АКФ с сохранением основных статистических свойств сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был предложен и исследован алгоритм модификации хаотического сигнала с целью обеспечения заданного уровня БЛ его АКФ. Проведенное численное моделирование и эксперименты подтвердили, что итерационная модификация с использованием градиентного анализа позволяет существенно уменьшить амплитуду БЛ, сохраняя при этом основные статистические характеристики исходного сигнала, такие как энергия и дисперсия. Это особенно важно для приложений в области систем связи и радиолокации, где даже незначительные отклонения в корреляционных свойствах могут приводить к ухудшению разрешающей способности и появлению межсимвольных помех.

Основные результаты проведенного исследования можно сформулировать следующим образом:

– предложенный алгоритм модификации, основанный на итерационном корректировании элементов последовательности с использованием градиентного анализа, позволяет добиться значительного снижения БЛ АКФ;

– при модификации сохраняются ключевые статистические свойства хаотического сигнала, что подтверждается анализом гистограмм распределения и спектральных характеристик;

– сравнительный анализ АКФ исходного и модифицированного сигналов продемонстрировал, что модифицированный сигнал обладает улучшенными корреляционными свойствами, что потенциально может повысить качество работы систем связи и радиолокационных комплексов.

Несмотря на достигнутые результаты, исследование выявило ряд аспектов, требующих дальнейшего изучения. К ним относятся:

– адаптивная настройка параметров алгоритма. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку алгоритмов адаптивного выбора коэффициента обучения η и весовой функции $w(k)$ в зависимости от текущих характеристик входного сигнала, что позволит улучшить сходимость и устойчивость алгоритма;

– применение параллельных вычислительных технологий. Для обработки длинных последовательностей и повышения скорости работы алгоритма актуально применение методов параллельных вычислений, что особенно важно для систем реального времени;

– интеграция с другими методами оптимизации. Сочетание данного подхода с методами машинного обучения и адаптивной фильтрацией может привести к созданию гибридных систем оптимизации, способных работать в условиях изменяющейся среды.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о высокой перспективности предложенного алгоритма модификации АКФ хаотического сигнала. Дальнейшие исследования в данной области позволят не только повысить качество сигналов в современных радиотехнических системах, но и расширить возможности их применения в других областях цифровой обработки сигналов.

Список использованных источников

1. *Коберниченко В. Г.* Основы цифровой обработки сигналов : учеб. пособие. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2018. – 123 с.

2. *Умняшкин С. В.* Основы теории цифровой обработки сигналов : учеб. пособие. – М. : Техносфера, 2016. – 528 с.

3. *Шишкин А. В.* Способ уменьшения уровня боковых лепестков автокорреляционной функции фазокодоманипулированного сигнала // StudNet. – 2021. – Т. 4, № 4. – С. 443–451.

4. Аппаратные и алгоритмические решения при проектировании РСА / А. Л. Переверзев [и др.] // Наноиндустрия. – 2019. – № 89. – С. 149–155.

5. *Тарасенко А. М.* Методика цифрового формирования сложных зондирующих сигналов для космических РСА // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 541–549.

А. С. Ефанов
Военная академия связи
имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого,
г. Санкт-Петербург.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С МНОЖЕСТВЕННЫМ АБОНЕНТСКИМ РАДИОДОСТУПОМ

В статье рассмотрены вопросы доступности информационного обмена средствам радиоконтроля и технического компьютерного контроля.

Цель работы – определение зависимости доступности средств связи средствам контроля от требований к информационному обмену на информационном направлении и варианта их использования для информационно-телекоммуникационной сети с множественным абонентским радиодоступом в условиях дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная сеть, сеть абонентского радиодоступа, контроль информационного обмена.

ВВЕДЕНИЕ

Современные информационно-телекоммуникационные системы (ИТКС) характеризуются:

– увеличением возможности по передаче контента;

– повышением требований абонентов к качеству услуг связи [1];

– появлением нового класса высокомобильных автоматизированных потребителей в виде робототехнических комплексов (РТК) [2];

– массовым применением средств радиосвязи, реализующих IP-технологию [3];

– внедрением новых коммуникационных устройств связи («Метафора» [4] и др.) на основе RoIP-протокола [5].

Указанные процессы привели к доведению цифровых услуг связи непосредственно до абонентов, характеризующихся малым значением времени квазистационарного состояния, что предопределило формирование нового структурного элемента – высокомобильной сети абонентского радиодоступа. Кроме того, совершенствование законодательной базы в области контроля качества и информационной безопасности ужесточает требования к обеспечению информационного обмена [6–9]. При этом в условиях дестабилизирующих факторов возникает задача контроля доступности ресурса ИТКС с целью гарантированного доведения услуг связи, соответствующих требованиям нормативно-правовых актов в области информационного обмена, до потребителей. Это вызвало необходимость исследования вопросов эффективности функционирования средств связи в новом элементе. Анализ известных моделей сетей и систем связи показал, что они являются общими [10] и не учитывают современные подходы к удовлетворению потребностей абонентов в высококачественных услугах связи.

В статье предлагается модель для получения зависимости параметров средств связи элементов системы от информационной нагрузки абонентов и их доступности средствам контроля в условиях применения разнородных средств связи, в том числе средств абонентского радиодоступа и коммуникационных устройств сопряжения типа RoIP-шлюз.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ И СТРУКТУРА МОДЕЛИ

Структура модели представлена на рис. 1 и включает в себя три основных блока:

– в первом блоке осуществляется формирование исходных данных по условиям функционирования самой ИТКС;

– во втором блоке осуществляется распределение средств связи на основе требований абонентов к качеству информационного обмена;

– в третьем блоке определяется доступность средств связи средствам радиоконтроля и технического компьютерного контроля.

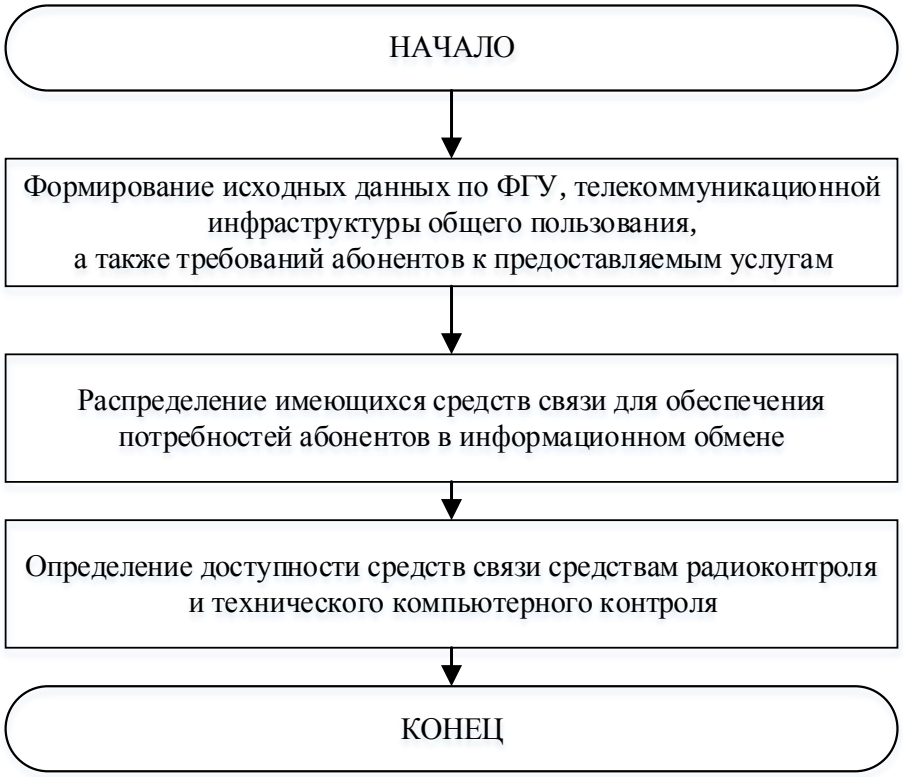


Рис. 1. Структура модели функционирования информационно-телекоммуникационной системы с множественным абонентским радиодоступом в условиях дестабилизирующих факторов

Современные ИТКС характеризуются множеством средств связи, имеющихся в ее распоряжении (радиосредства, средства спутниковой связи, средств беспроводного широкополосного доступа, ретрансляторы, маршрутизаторы и др.):

$$\{R\} = \{R_1\} \cup \{R_2\} \cup \{R_i\}, \quad (1)$$

где каждому из них соответствует совокупность тех или иных характеристик:

$$\{R_i\} \in \{F_i; P_i; V_i; B_i; Y_i; PP_i; M_i; IP_i; ...\}, \quad (2)$$

где F_i – частотный диапазон работы средства связи, МГц;

P_i – мощность средства связи, Вт;

V_i – максимальная скорость передачи данных, кбит/с;

B_i – вероятность символьной ошибки;

Y_i – вид шифрования;

PP_i – наличие псевдослучайной перестройки радиочастоты (ППРЧ), скачков/с;

M_i – вид модуляции;

IP_i – характеристика пакетной передачи данных.

Исходными данными для модели являются:

– граф направлений связи пользователей с учетом сети абонентского радиодоступа $G_{HC}\left((x,y);d_j\right)$ с координатами $(x;y)$ вершин и длинной плеча радиодоступа d_j;

– множество показателей предоставляемых им услуг $\left\{M_{W_n}\right\}$, где $\left\{M_{W_n}\right\}\in\{C_1\}\bigcup\{C_2\}\{C_k\}$.

Для расчета информационной нагрузки на ИТКС необходимо определить на каждом информационном направлении D_j каждому источнику нагрузки K_z необходимые услуги связи W_n, которые определяются временем функционирования потребителя в сети абонентского радиодоступа:

$$\{K_z\}\in\{W_n\};\{X_n(t)\};\{B_n;Y_n;T_c\};\left\{\Delta t_{\text{функц.}}\right\}, \tag{3}$$

где $\{X_n(t)\}$ – функция зависимости интенсивности трафика от времени;

B_n – максимальная вероятность символьной ошибки для *n*-го информационного направления;

Y_n – минимально необходимый вид шифрования для *n*-го информационного направления;

T_c – максимальное время доставки сообщений для *n*-го информационного направления;

$\Delta t_{функц.}$ – время функционирования потребителя в сети абонентского радиодоступа.

Задача формирования пропускной способности в интересах обеспечения потребностей абонентов в информационном обмене определяется тем средством связи, которое возможно задействовать на соответствующих информационных направлениях. При этом важной остается задача контроля предоставления услуг связи потребителям средствами радиоконтроля и технического компьютерного контроля в условиях дестабилизирующих факторов. Под дестабилизирующими факторами в статье будем понимать любое воздействие природного, техногенного или преднамеренного характера, влияющее на качество ведения информационного обмена как в электромагнитной среде, так и в логических сетях связи с пакетной передачей данных.

Характеристики техники связи будут определять значения основных показателей к образованным каналам и качеству предоставляемых услуг (например, голос, данные или видео). При этом основным параметром для средств абонентского радиодоступа является мощность излучения в рабочей полосе частот, влияющая на дальность связи и, соответственно, на возможность радиоконтроля качества предоставляемых услуг связи.

В статье под электромагнитной доступностью (ЭМД) будем понимать вероятностную оценку возможности регистрации, технического анализа и распознавания сигналов заданных источников радиоизлучения (ИРИ) в интересах приема передаваемой ими информации с требуемой вероятностью и достоверностью. Далее будем полагать, что ЭМД обеспечивается при условии превышения на заданные значения мощности сигнала над мощностью шума на входе радиоприемного устройства.

Расчет вероятности электромагнитной доступности ИРИ средствам радиоконтроля можно провести по формуле [11, 12]

$$P_{\text{ЭДМ}}=P(\bar{z}\geq z_{\text{ТР}})=\int_{Z_{\text{ТР}}}^{\infty}W(z)\partial z, \tag{4}$$

где $W(z)$ – плотность распределения вероятностей измеренных значений z на входе приемника.

При большом числе измерений распределение уровней сигналов и шума во времени может быть описано нормальным законом, что позволяет условие (4) привести к виду

$$P_{\text{ЭДМ}} = P(\bar{z} \geq z_{\text{ТР}}) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \int_{z_{\text{ТР}}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\bar{z} \geq z_{\text{ТР}})^2}{2\sigma_z^2} \right] \partial z = \Phi(u), \quad (5)$$

где $\bar{z}$ – превышение среднего уровня сигнала над средним уровнем шума, $\bar{z} = \overline{P_{\text{с}}} - \overline{P_{\text{ш}}}$;

$\Phi(u)$ – интегральная функция нормального распределения случайной величины z;

u – аргумент интеграла вероятности, $u = \dfrac{\bar{z} - z_{\text{ТР}}}{\sigma_z}$;

σ_z – СКО превышения уровня сигнала над уровнем шума от его среднего значения.

При этом мощность сигнала на входе приемника P_{2A} на основании уравнения идеальной радиопередачи (рис. 2) рассчитаем по формуле [13]

$$P_{2A} = \frac{P_{1A} G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} f_T^{\,2} f_R^{\,2}, \quad (6)$$

где P_{1A} – мощность на передающей антенне;

G_T – усиление передающей антенны;

G_R – усиление приемной антенны;

λ – длина волны;

f_T – функция диаграммы направленности передающей антенны;

f_R – функция диаграммы направленности приемной антенны;

d – расстояние между приемной и передающей антеннами.

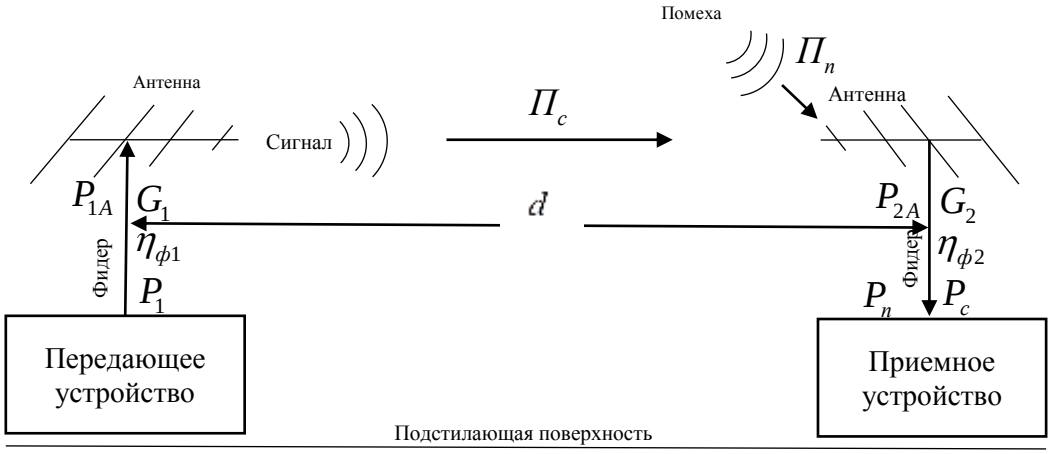


Рис. 2. Обобщенная схема радиолинии

Из выражения (6) вычислим прогнозируемое расстояние между приемной и передающей антеннами, что и будет определять зону электромагнитной доступности для средств радиоконтроля:

$$d = \frac{\lambda f_T f_R}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{2A} G_T G_R}{P_{1A}}} . \quad (7)$$

Для наглядности, а также с учетом тактико-технических характеристик средств радиоконтроля, примем, что время работы средств на излучение соответствует времени работы средства радиоконтроля:

$$t_{\text{раб.ср.изл.}} \triangleq t_{\text{раб.ср.контр.}} . \quad (8)$$

Современные цифровые средства радиосвязи позволяют соединять их в сеть связи с пакетной передачей данных, а для средств радиосвязи, реализованных по аналоговым технологиям, созданы специальные устройства RoIP-шлюзы. При этом появляется возможность осуществлять технический компьютерный контроль предоставления услуг радиосвязи потребителям через средства радиоконтроля. Кроме того, открывается возможность одновременного мониторинга как средствами радиоконтроля, так и средствами технического компьютерного контроля, что повышает общую эффективность.

Вероятность технического компьютерного контроля в сетях общего пользования можно определить, в соответствии с ГОСТ Р 53111-2008 [14], по значению вероятности связности между выбранными полюсами графа сети с помощью перебора простых цепей. Под связностью p_{ij}^k k-го пути μ_{ij}^k из перечня всех цепей μ_{ij} будем понимать совместную вероятность исправного состояния всех ребер и вершин, образующих эту цепь:

$$p_{ij}^k = \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} (1 - q_a) = \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} p_a , \quad (9)$$

где p_a – коэффициент готовности a-го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути μ_{ij}^k;

q_a – коэффициент неготовности a-го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути μ_{ij}^k, $q_a = (1 - p_a)$.

Под вероятностью ведения технического компьютерного контроля $P_{\text{ТКК}}$ от v_i к v_j будем понимать вероятность исправного состояния хотя бы одной цепи из всех возможных цепей или (при ограничении числа транзитных участков $r_{\max}$) хотя бы одной цепи с допустимым рангом:

$$P_{\text{ТКК}} = p_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} (1 - p_{ij}^k) . \quad (10)$$

Вероятность ведения радиоконтроля и технического компьютерного контроля определим по формуле полной вероятности для двух независимых событий:

$$P = P_{\text{РК}} + P_{\text{ТКК}} - (P_{\text{РК}} \times P_{\text{ТКК}}), \quad (11)$$

где $P_{\text{РК}}$ – вероятность ведения радиоконтроля;

$P_{\text{ТКК}}$ – вероятность ведения технического компьютерного контроля.

После проведения вычисления для всех информационных направлений с учетом заранее известных мест расположения средств РК и ТКР ($P_1, P_2, ..., P_N$) можно вычислить значение вероятности ведения контроля за информационным обменом на всех информационных направлениях по формуле (формула полной вероятности)

$$P_{\text{контр.}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{контр.ИН}_i} P_{\text{контр.}|\text{контр.ИН}_i}, \quad (12)$$

где $P_{\text{контр.ИН}_i}$ – вероятность контроля ведения информационного обмена на *i*-м информационном направлении;

$P_{\text{контр.}|\text{контр.ИН}_i}$ – вероятность контроля информационного обмена системы при условии заданной вероятности контроля ведения информационного обмена на *i*-м информационном направлении.

Тогда оптимизационная задача заключается в оптимальном расположении средств радиоконтроля при условии соответствия заданной вероятности ведения контроля информационного обмена на информационных направлениях средствами РК и ТКК, которая представляет собой задачу линейного программирования:

$$d = \arg\max_{d \in D} P_{\text{контр.}}(d), \quad (13)$$

где d – длина плеча радиодоступа;

$P_{\text{контр.}}(d)$ – вероятность контроля информационного обмена при заданной длине плеча радиодоступа;

D – диапазон значений длины плеча радиодоступа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ ЗА ИНФОРМАЦИОННЫМ ОБМЕНОМ

Рассмотрим информационное направление между абонентами А и Б (рис. 3) на радиостанциях Kirisun DP990 со следующими характеристиками:

P_{1A} – 5/1 Вт;

G_T – 20 дБ;

G_R – 20 дБ;

λ – 0,693 м;

f_T – 1 (для круговой диаграммы направленности);

f_R – 1 (для круговой диаграммы направленности).

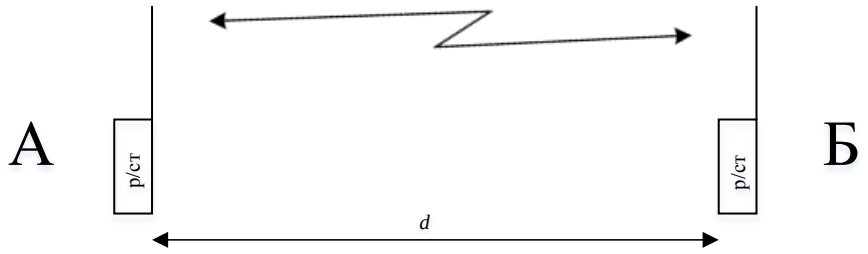


Рис. 3. Вариант схемы радиолинии

Вариант 1.

Если не используются направленные антенны, то от абонента Б до потенциального средства радиоконтроля будет такое же расстояние d (рис. 4), рассчитываемое по выражению (7), которое составит 4490 м, что соответствует заявленным производителем характеристикам. Тогда, по формуле (5) $P_{\text{ЭДМ}} = P(\bar{z} \geq z_{\text{ТР}}) \approx 1$.

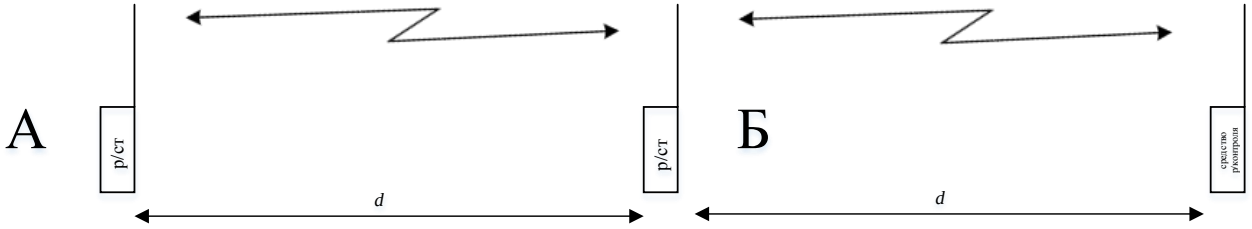


Рис. 4. Расположение средства радиоконтроля

Вариант 2.

При ведении работы на уменьшенной мощности 1 Вт для обеспечения заданной дистанции связи необходимо установить ретрансляторы связи (РТР). По формуле (7) вычисляем дальность ведения радиосвязи $l = 2000$ м. При общей дальности связи в 4490 м необходимо установить два РТР. Тогда при нахождении средства радиоконтроля на расстоянии 4490 м по формуле (5) $P_{ЭДМ} = P(\bar{z} \geq z_{ТР}) \approx 0,35$. При этом средство радиоконтроля, находящееся на дистанции связи d, фактически не будет иметь технической возможности осуществлять контроль информационного обмена (рис. 5).

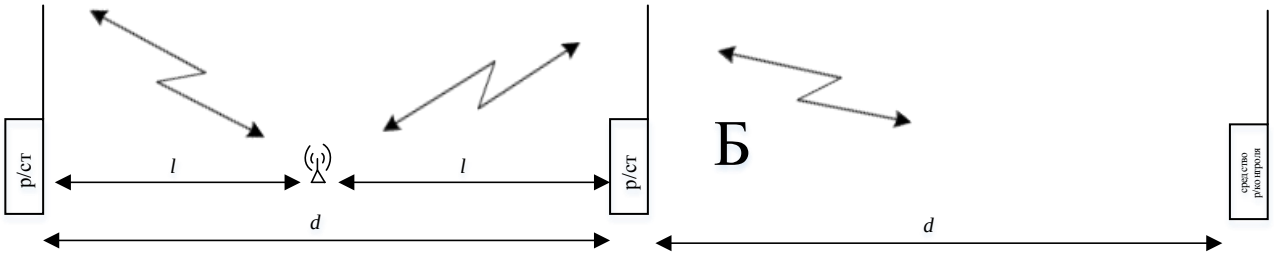


Рис. 5. Расположение средств радиоконтроля при использовании ретранслятора связи на малых мощностях передатчиков

Вариант 3а.

Для связи абонентов А и Б, обеспеченных средствами связи с несовместимыми характеристиками (например, Kirisun DP990 и Р-048У) для осуществления ведения информационного обмена необходимо соединить их средства связи через стандартизированные сети связи (например, сети связи с пакетной передачей данных) (рис. 6).

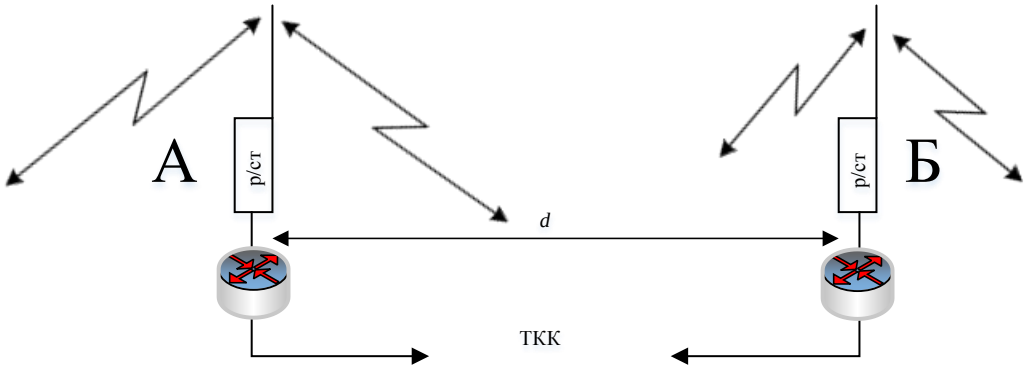


Рис. 6. Ведение информационного обмена через сеть связи с пакетной передачей данных

Средство связи корреспондента Б на излучение работает в своей сети на малой мощности излучения, а средство связи корреспондента А работает в обычном режиме. При таком варианте технических решений для обеспечения связи на информационном направлении А–Б радиоконтроль информационного обмена теряет смысл, однако данный способ дает возможность ведения технического компьютерного контроля, а дистанция связи d не имеет значения – важна сетевая доступность.

Пусть имеется два независимых пути прохождения с двумя ребрами на первом пути и тремя ребрами на втором пути при коэффициентах готовности ребер 0,9 в соответствии со схемой сети, изображенной на рис. 7, для варианта 3а. Тогда, вероятность ведения технического компьютерного контроля для корреспондента Б по формуле (10) $P_{ТКК} = 0{,}95$.

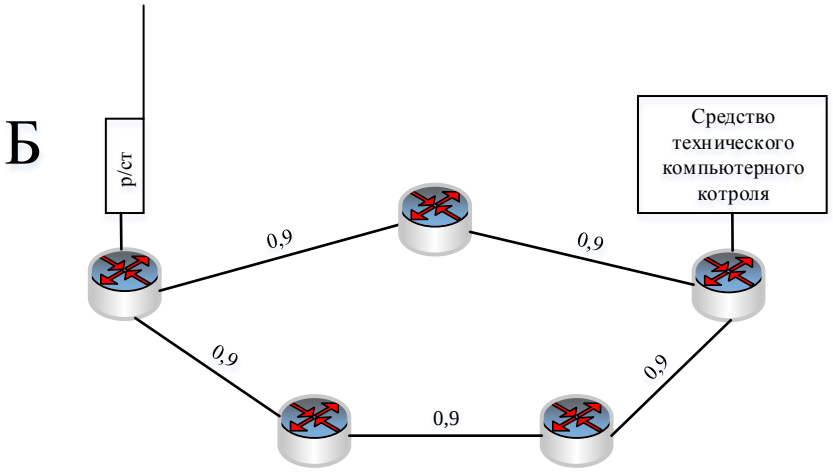


Рис. 7. Схема сети для варианта 3а

Вариант 3б.

Рассмотрим вариант с одним возможным путем прохождения с двумя ребрами при коэффициентах готовности ребер 0,9 в соответствии со схемой сети, изображенной на рис. 8, для варианта 3б. Тогда, вероятность ведения технического компьютерного контроля для корреспондента Б по формуле (10) $P_{ТКК} = 0{,}81$.

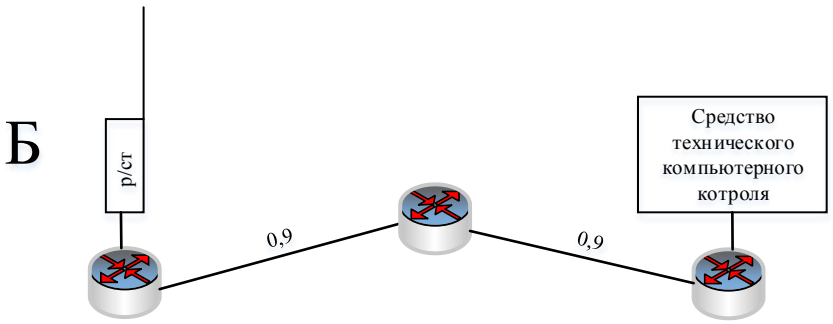


Рис. 8. Схема сети для варианта 3б

Вариант 4.

Рассмотрим вариант ведения информационного обмена от корреспондента Б с корреспондентами А и С (рис. 9).

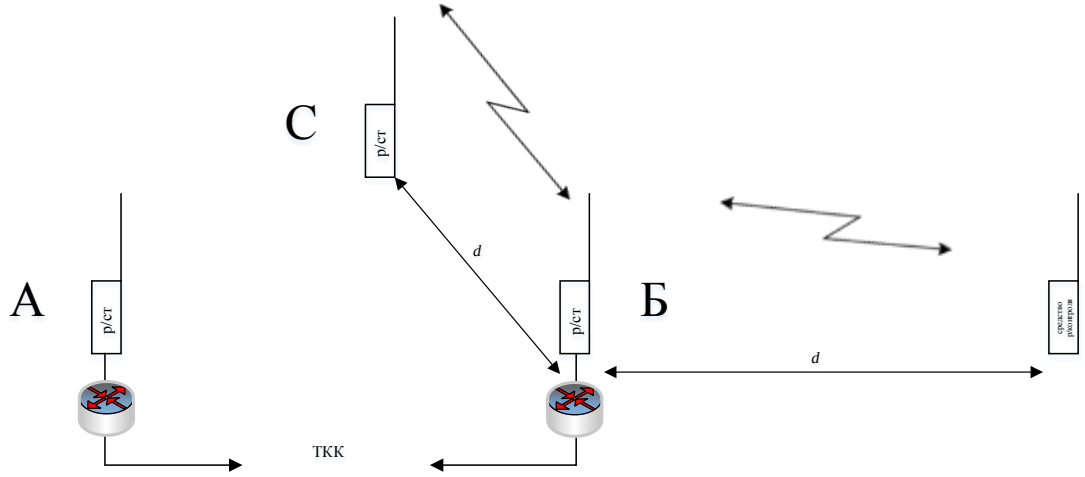


Рис. 9. Вариант ведения информационного обмена по радиоканалу с мощностью передатчика 5 Вт и по сети связи с пакетной передачей данных

Пусть между корреспондентами А и Б информационный обмен ведется по сети с пакетной передачей данных с использованием RoIP-шлюзов, а обмен между корреспондентами Б и С осуществляется по радиоканалу с мощностью передатчика 5 Вт. Таким образом, в отношении корреспондента Б ведутся радиоконтроль и технический компьютерный контроль (в соответствии с рис. 8). Тогда вероятность контроля информационного обмена от корреспондента Б вычисляется по формуле (11) и составляет $P = 0{,}99$.

Вариант 5.

Рассмотрим вариант ведения информационного обмена, аналогичный предыдущему, за исключением мощности передатчика у корреспондентов Б и С – по 1 Вт (рис. 10).

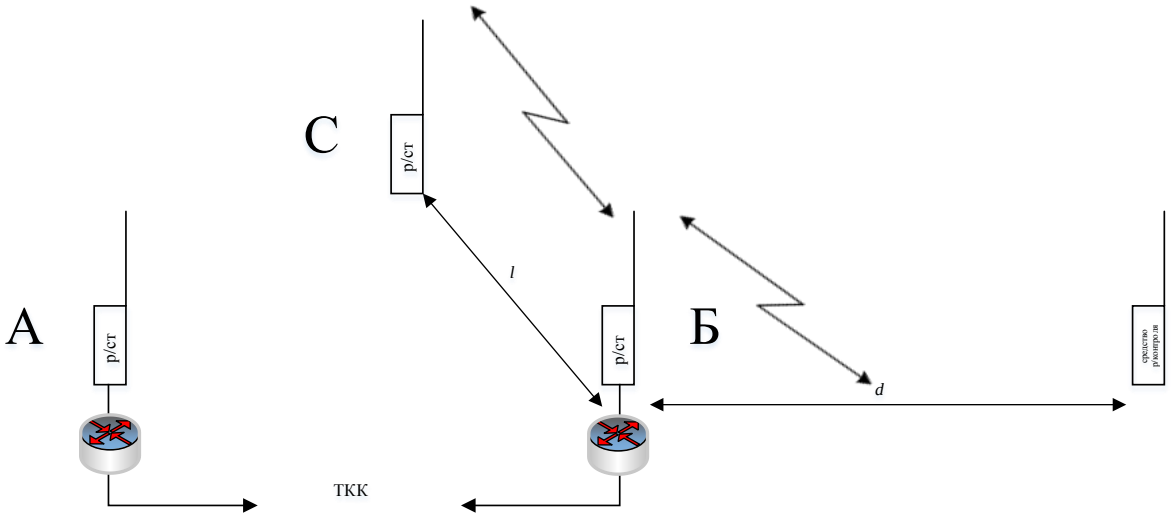


Рис. 10. Вариант ведения информационного обмена по радиоканалу с мощностью передатчика 1 Вт и по сети связи с пакетной передачей данных

Тогда вероятность контроля информационного обмена от корреспондента Б вычисляется по формуле (11) и составляет $P = 0{,}877$.

Для проведения анализа вариантов ведения информационного обмена представим результаты вычислений в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1

Результаты вычислений вероятности ведения контроля за информационным обменом в зависимости от вариантов задействования средств связи

Номер варианта ведения информационного обмена	Мощность передатчика	Вероятность ведения РК	Вероятность ведения ТКК	Вероятность ведения РК и ТКК
Вариант 1	5	0,95	0	0,95
Вариант 2	1	0,35	0	0,35
Вариант 3а	0	0	0,95	0,95
Вариант 3б	0	0	0,81	0,81
Вариант 4	5	0,95	0,81	0,99
Вариант 5	1	0,35	0,81	0,877

При уменьшении излучаемой мощности вероятность ведения радиоконтроля снижается (при условии неизменного положения средств радиоконтроля). При «перемещении» информационного обмена из электромагнитного пространства в проводные сети связи с пакетной передачей данных на основе ресурса ССОП наблюдается стабильный рост совместной вероятности ведения РК и ТКР, особенно при увеличении количества независимых путей для обеспечения сетевой доступности контролируемого устройства.

Необходимо отметить, что при организации информационного обмена современными цифровыми радиосредствами может задействоваться также и технический компьютерный контроль (при обеспечении соответствующей ЭМД средствам радиоконтроля), позволяющий вести контроль информационного обмена на логическом уровне. Тогда вероятность ведения контроля информационного обмена на информационном направлении на этих средствах будет рассчитываться по формуле полной вероятности для РК и ТКК, т. е. ТКК возможен и для средств радиосвязи.

Таким образом, получены зависимости вероятности контроля ведения информационного обмена от характеристик используемых средств связи, от мест расположения средств радиоконтроля и технического компьютерного контроля, связности сети общего пользования, а также вариантов построения маршрутов ведения информационного обмена. Эти зависимости можно использовать для определения ТТХ применяемых средств связи на информационных направлениях в зависимости от требований к контролю информационного обмена в условиях дестабилизирующих факторов различного характера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимость разработки представленной модели функционирования ИТКС обусловлена появлением нового класса телекоммуникационных объектов, ограниченных по времени функционирования, энергетике, возможностям и другим показателям, что требует особого подхода к контролю информационного обмена, осуществляемого на их основе. Модель позволяет получить данные о вероятности ведения контроля за информационным обменом в сети абонентского радиодоступа, в том числе с задействованием RoIP-шлюзов.

Разработанная модель учитывает:

– мобильных потребителей (абонентов) ресурсов ИТКС как отдельный класс объектов по признаковому фону (мощность излучения в рабочей полосе частот и сетевая доступность);

– новый телекоммуникационный объект в виде локализованной сети абонентского радиодоступа к сетевой структуре, интегрированной в ИТКС общего пользования, по показателю плеча абонентского радиодоступа при формировании структуры сети;

– возможность ведения ТКК для цифровых средств радиосвязи.

Модель позволяет получать статистически устойчивые данные о функционировании элементов сети радиодоступа, необходимых для дальнейшего решения оптимизационной задачи по повышению эффективности ее функционирования в условиях дестабилизирующих факторов.

Список использованных источников

1. Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года [Утв. распоряжением Правительства РФ от 24 ноября 2023 г. № 3339-р] // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL : static.government.ru/media/files/Pc7fHuejbNvqv17b0RJNv0RIqTo2)IUV.pdf (дата обращения: 05.10.2025).

2. *Иванов В. Г., Лукьянчик В. Н., Поляков Д. Н.* Повышение устойчивости управления и связи робототехническими комплексами военного назначения в современных операциях // Телекоммуникации и связь. – 2024. – № 1. – С. 16–29.

3. *Лозов А. С.* Стандарт радиосвязи DMR для системы связи // Системы безопасности. – 2017. – № 26. – С. 360–363.

4. Метафора : [официальный сайт]. – URL: https://metapho.ru/ (дата обращения: 05.10.2025).

5. Pat. 20200213818A1 USA : МПК H04 W4/08. Radio-over-internet-protocol (roip) gateway talk group configuration / Stephen Wilson, Estelle Tidey. – № 20200213818 at 26.12.2019; declar. 26.12.2019; publ. 02.07.2020.

6. ГОСТ Р 52292-2004. Информационная технология. Электронный обмен информацией. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2004. – 27 с.

7. ГОСТ Р 43.0.29-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационное обеспечение техники и операторской деятельности. Обмен информационный. – М. : Стандартинформ, 2022. – 27 с.

8. ГОСТ Р ИСО 9000-2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М. : Стандартинформ, 2001. – 27 с.

9. ГОСТ Р 59547-2021. Защита информации. Мониторинг информационной безопасности. Общие положения. – М. : Стандартинформ, 2021. – 27 с.

10. *Макаренко С. И.* Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки : моногр. – СПб. : Наукоемкие технологии, 2020. – 337 с.

11. Методика оценивания электромагнитной доступности в многопозиционных радиотехнических системах / И. Ю. Еремеев [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 5–11.

12. *Gerasimiuk M., Pospieszny M., Winiewski W. Z.* EIRP-Based radio coverage estimation for 5G NR in urban macro and indoor scenarios // IEEE transactions on vehicular technology. – 2025. – Vol. 72, № 5. – P. 6110–6123.

13. Методика повышения достоверности оценки параметров электромагнитной обстановки в районе функционирования элементов сети абонентского радиодоступа / А. С. Ефанов [и др.] // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2025. – Вып. 11-12 (209-210). – С. 23–29.

14. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – М. : Стандартинформ, 2009. – 27 с.

С. В. Логунов,
кандидат технических наук;
Г. Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор;
С. А. Нахов

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При анализе условий наблюдения техногенных космических объектов наземными оптико-электронными системами мониторинга околоземного космического пространства характеристики излучения объектов, наблюдаемых в естественной солнечной подсветке, могут задаваться двумя способами – с использованием энергетических и фотометрических характеристик. Разработана методика пересчета фотометрических характеристик наблюдаемых космических объектов в их энергетические характеристики и представлены аналитические выражения и примеры пересчета. Методика основана на взаимосвязи спектральной плотности потока оптического излучения, освещенности и эквивалентной звездной величины наблюдаемого космического объекта как источника излучения, что обеспечивает пересчет его эффективной поверхности рассеяния в эквивалентную звездную величину.

Ключевые слова: космический объект, наземная оптико-электронная система, эффективная поверхность рассеяния, звездная величина.

ВВЕДЕНИЕ

Наземные оптико-электронные системы (ОЭС) в настоящее время являются основным типом информационных средств наблюдения за космическими объектами (КО) в интересах мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) и оценки космической обстановки [1–3]. ОЭС обеспечивают поиск, обнаружение и сопровождение КО, а также получение координатной и некоординатной информации (НКИ) о них. Среди различных видов НКИ о КО следует выделить фотометрическую информацию в виде фотометрических кривых блеска (ФКБ). В сравнении с другими видами НКИ о КО фотометрическая информация является наиболее доступной, поскольку она может быть получена при наблюдении КО наземными ОЭС низкого разрешения в пассивном режиме работы с естественной солнечной подсветкой [4, 5].

Особенностью регистрации и обработки ФКБ в наземных ОЭС является их предварительная калибровка по опорным звездам. При этом блеск опорных звезд и КО, наблюдаемых в естественной солнечной подсветке, как правило, задается в фотометрических (светотехнических) единицах измерения светового потока, а технические характеристики ОЭС и условия приема оптического излучения, отраженного наблюдаемым КО, определяются в энергетических единицах мощности принимаемого сигнала. Можно говорить об определенных областях применения фотометрических и энергетических характеристик источников оптического излучения, сложившихся к настоящему времени [6, 7]. В то же время и те и другие могут использоваться на практике при представлении результатов наблюдений КО и при их последующей обработке [8, 9], а также для анализа условий наблюдения КО наземными ОЭС и их возможностей по регистрации оптического излучения КО. Поэтому необходимо осуществлять пересчет одних характеристик в другие. В результате возникает необходимость в методике пересчета фотометрических характеристик наблюдаемых КО в их энергетические характеристики. Основная сложность при таком пересчете заключается в необходимости учета взаимосвязи спектральной плотности потока оптического излучения, освещенности и экви-

валентной звездной величины наблюдаемого КО. В статье представлена методика пересчета интегрального блеска КО в энергетические характеристики принимаемого оптического излучения с учетом факторов, существенных при анализе условий наблюдения КО наземными ОЭС.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Системы энергетических и фотометрических характеристик источников оптического излучения и их качественное соответствие рассмотрены в работах [6, 7]. Энергетические характеристики выражаются в единицах измерения системы СИ и используются при расчете уровня принимаемого сигнала и отношения сигнал/шум, определяющего технические характеристики информационных и измерительных ОЭС. Фотометрические характеристики основаны на оценке ощущения оптического излучения в видимом диапазоне глазом человека и выражаются в светотехнических единицах измерения, а также приводятся к эквивалентным звездным величинам, в которых в астрономии принято характеризовать яркость звезд.

Основной энергетической характеристикой оптического излучения является поток излучения Φ_e – мощность, переносимая оптическим излучением, измеряемая в ваттах. Интегральный поток оптического излучения в заданной полосе длин волн $\Delta\lambda$ определяется выражением

$$\Phi_e = \int\limits_{(\Delta\lambda)} \Phi_e(\lambda) d\lambda, \qquad (1)$$

где $\Phi_e(\lambda)$ – спектральная плотность потока оптического излучения, интегрирование осуществляется в анализируемой полосе длин волн $\Delta\lambda$.

Отношение потока излучения, падающего на малый элемент поверхности, к его площади называется энергетической освещенностью (облученностью) поверхности. Она определяется в виде $E_e = d\Phi_e / dS$, где $d\Phi_e$ – поток излучения, падающий на элемент поверхности, площадью dS. Тогда интегральный поток оптического излучения, падающий на приемную апертуру телескопа ОЭС и выраженный через энергетическую освещенность поверхности, составляет $\Phi_e = E_e S_{\text{прм}}$, где $S_{\text{прм}}$ – площадь приемной апертуры телескопа ОЭС.

Оптическим излучением, падающим на приемную апертуру телескопа ОЭС, является излучение солнечной подсветки, отраженное (рассеянное) поверхностью КО. В соответствии с выражением (1) интегральный поток оптического излучения, отраженного КО, определяется выражением

$$\Phi_{\text{КО}e} = \int\limits_{(\Delta\lambda)} \Phi_{\text{КО}e}(\lambda) d\lambda, \qquad (2)$$

где $\Phi_{\text{КО}e}(\lambda)$ – спектральная плотность потока оптического излучения, отраженного КО, интегрирование осуществляется в анализируемой полосе длин волн $\Delta\lambda$.

Интегральный поток оптического излучения, отраженного КО, составляет $\Phi_{\text{КО}e} = E_{\text{КО}e}\sigma_0$, где $E_{\text{КО}e}$ – энергетическая освещенность КО, а σ_0 – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) КО.

Основными характеристиками отражающих свойств КО являются ЭПР и индикатриса рассеяния, характеризующая пространственное распределение интенсивности отраженного поверхностью КО солнечного излучения. ЭПР наблюдаемого КО – это воображаемый плоский эквивалент его поверхности, который диффузно рассеивает падающую на него световую

волну в переднюю полусферу, определяемую угловой мерой π, создавая в точке приема на приемной апертуры телескопа ОЭС такую же освещенность, как и реальный КО.

Введение ЭПР эквивалентно замене реального объекта (КО) источником, излучающим равномерно во всех направлениях. Это позволяет сравнивать отражательные свойства любых КО, не уточняя их геометрическую форму, материал поверхности и габаритные размеры. При описании наблюдаемого КО его ЭПР интегральная энергетическая освещенность приемной апертуры телескопа наземной ОЭС, создаваемая КО с ЭПР σ_0, определяется выражением

$$E_{\text{ОЭС}e} = \frac{E_{\text{КО}e}\sigma_0\gamma_{\text{атм}}}{4\pi R_{\text{КО}}^2}, \tag{3}$$

где $R_{\text{КО}}$ – дальность до КО;

$\gamma_{\text{атм}}$ – интегральное пропускание оптического излучения атмосферой на трассе распространения оптического излучения.

Величина ЭПР КО задается либо в результате оптико-геометрического моделирования КО и суммирования ЭПР всех видимых освещенных элементов поверхности КО с учетом их формы, ракурса наблюдения и направления подсветки [10, 11], либо в виде ЭПР типовых объектов оптической локации, например, сферы или диска с заданными коэффициентами отражения $\rho_{\text{КО}}$ [12]. Коэффициент отражения поверхности КО в практике космических наблюдений принято называть альбедо КО и представлять в виде интегрального коэффициента отражения в видимой области спектра, усредненного по поверхности КО. Как правило, значение альбедо КО составляет величину от 0,1 до 0,4.

Облученность КО создается излучением солнечной подсветки. Интегральная облученность КО определяется выражением

$$E_{\text{КО}e} = \int\limits_{(\Delta\lambda)} H_{\text{КО}e}(\lambda)d\lambda, \tag{4}$$

где $H_{\text{КО}e}(\lambda)$ – спектральная облученность КО излучением солнечной подсветки, Вт/м^3. При этом нтегрирование осуществляется в анализируемой полосе длин волн $\Delta\lambda$.

При описании Солнца как излучающего абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой $T_{\text{С}}$ облученность солнечным излучением КО, находящегося в ОКП, характеризуется спектральной облученностью

$$H_{\text{КО}e}(\lambda) = \frac{\pi^2 hc^2 D_{\text{С}}^2}{2\lambda^5 R_{\text{С}}^2}\left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_{\text{С}}}\right) - 1\right]^{-1}, \tag{5}$$

где h – постоянная Планка, $h = 6{,}62\cdot10^{-34}$ Дж·с;

c – скорость света в вакууме, $c = 3\cdot10^8$·м/с;

k – постоянная Больцмана, $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К;

$T_{\text{С}}$ – шумовая температура Солнца, $T_{\text{С}} = 5800$°К;

$D_{\text{С}}$ – диаметр Солнца, $D_{\text{С}} = 1{,}39\cdot10^6$ км;

$R_{\text{С}}$ – расстояние от Солнца до Земли, $R_{\text{С}} = 1{,}5\cdot10^8$ км.

Выражение (5) соответствует интенсивности спектрального распределения энергии, излучаемой единичной площадкой АЧТ с температурой $T = T_{\text{С}}$, определяемой законом Планка $H(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1\right]^{-1}$, и видимому с Земли угловому размеру Солнца $\alpha_{\text{С}} = D_{\text{С}} / R_{\text{С}}$:

$$H_{\text{КО}e}(\lambda) = \frac{\pi\alpha_{\text{С}}^2}{4} H(\lambda). \tag{6}$$

Таким образом, интегральная энергетическая освещенность приемной апертуры наземной ОЭС, создаваемая КО с ЭПР σ_0, находящимся на дальности $R_{КО}$, составляет

$$E_{ОЭСe} = \frac{\sigma_0 \gamma_{атм}}{4\pi R_{КО}^2} \int\limits_{(\Delta\lambda)} H_{КОe}(\lambda) d\lambda . \quad (7)$$

Для получения расчетных зависимостей, связывающих энергетические и фотометрические характеристики оптического излучения, принимаемого наземной ОЭС, величину энергетической освещенности приемной апертуры наземной ОЭС, определяемую выражением (7) и измеряемую в ваттах на метр квадратный, необходимо связать с ее световой освещенностью, создаваемой тем же КО, измеряемой в люксах (люменах на метр квадратный).

В системе фотометрических величин характеристикой, эквивалентной потоку излучения Φ_e, является световой поток – поток излучения, воспринимаемый человеческим глазом, измеряемый в люменах. Интегральный световой поток определяется выражением [6]

$$\Phi_v = \int\limits_{(\Delta\lambda)} \Phi_v(\lambda) d\lambda , \quad (8)$$

где $\Phi_v(\lambda)$ – спектральная плотность светового потока оптического излучения. При этом интегрирование осуществляется в анализируемой полосе длин волн $\Delta\lambda$.

Световая освещенность поверхности есть отношение светового потока, падающего на малый элемент поверхности, к его площади. Она определяется аналогично энергетической освещенности в виде $E_v = d\Phi_v / dS$, где $d\Phi_v$ – световой поток, падающий на элемент поверхности, площадью dS. Тогда интегральный световой поток, падающий на приемную апертуру телескопа ОЭС, выраженный через световую освещенность поверхности, составляет $\Phi_v = E_v S_{прм}$, где $S_{прм}$ – площадь приемной апертуры телескопа ОЭС.

При определении величины интегрального светового потока Φ_v в заданной полосе длин волн $\Delta\lambda$ в виде (8) она определяется через спектральную плотность потока оптического излучения $\Phi_e(\lambda)$ в соответствии с выражением [6]

$$\Phi_v = 683 \int\limits_{(\Delta\lambda)} V(\lambda)\Phi_e(\lambda) d\lambda , \quad (9)$$

где $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность (кривая видности) оптического излучения, а световой эквивалент потока излучения, позволяющий перейти от энергетических к светотехническим единицам измерения, составляет 683 лм/Вт.

Функция $V(\lambda)$ задается графически или справочными данными [7, 8] и аппроксимируется зависимостью [13]

$$V(\lambda) = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - 0{,}559}{0{,}060283} \right)^2 \right], \quad (10)$$

где длина волны λ задается в микрометрах.

Система фотометрических величин, принятых в астрономии, основана на понятии «звездная величина» [6, 7]. Если в энергетических и светотехнических системах величин освещенность измеряется в ваттах на метр квадратный и в люксах, то в астрономии, в силу исторических традиций, принято использовать звездные величины m, связанные со световой освещенностью логарифмической зависимостью $m = m_0 – 2{,}5 \lg E_v$, где m_0 – звездная величина космического или астрономического объекта, создающего освещенность в 1 лк. Звездная величина – безразмерная числовая характеристика яркости объекта. В соответствии с определением звездной величины – чем ярче объект, тем ниже его звездная величина.

Наблюдения КО осуществляются на фоне звездных стандартов, выбранных в качестве «нуль-пункта», и для калибровки наблюдений используют стандартные константы звездных

величин [14]. Они определяются исходя из того, что освещенность $E_v = 1$ лк на земной поверхности и соответственно на приемной апертуре ОЭС создает объект со звездной величиной $m_0 = -14{,}18$. Тогда интегральная световая освещенность приемной апертуры наземной ОЭС, создаваемая КО со звездной величиной m, составляет $E_{\text{ОЭС}v} = 10^{-0{,}4(m+14{,}18)}$, а интегральный световой поток, создаваемый КО со звездной величиной m, падающий на приемную апертуру ОЭС, определяется выражением

$$\Phi_v = 10^{-0{,}4(m+14{,}18)} S_{\text{прм}}. \tag{11}$$

Этот же интегральный световой поток может быть выражен через спектральную плотность потока оптического излучения $\Phi_e(\lambda)$ в соответствии с выражением (9). Определяя спектральную плотность потока оптического излучения в виде $\Phi_e(\lambda) = \dfrac{\sigma_0 \gamma_{\text{атм}} S_{\text{прм}}}{4\pi R_{\text{КО}}^2} H_{\text{КО}e}(\lambda)$, получаем

$$\Phi_v = 683 \frac{\sigma_0 \gamma_{\text{атм}} S_{\text{прм}}}{4\pi R_{\text{КО}}^2} \int\limits_{(\Delta\lambda)} V(\lambda) H_{\text{КО}e}(\lambda) d\lambda \ . \tag{12}$$

Приравнивая выражения для Φ_v (11) и (12), получаем выражение, связывающее характеристики наблюдаемого КО (ЭПР σ_0 и дальность $R_{\text{КО}}$) с его звездной величиной m:

$$683 \frac{\sigma_0 \gamma_{\text{атм}}}{4\pi R_{\text{КО}}^2} \int\limits_{(\Delta\lambda)} V(\lambda) H_{\text{КО}e}(\lambda) d\lambda \ = 10^{-0{,}4(m+14{,}18)}, \tag{13}$$

где спектральная облученность КО излучением солнечной подсветки $H_{\text{КО}e}(\lambda)$ определяется выражением (5). Интегральное пропускание оптического излучения атмосферой на трассе распространения оптического излучения в выражении (13) полагается равным $\gamma_{\text{атм}} = 0{,}77$, что соответствует условиям определения эталонной звездной величины $m_0 = -14{,}18$ на поверхности Земли после прохождения оптическим излучением атмосферы [14].

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Полученное выражение (13) позволяет осуществлять пересчет фотометрических характеристик КО, наблюдаемых наземными ОЭС, в их энергетические характеристики и получить аналитические выражения, связывающие ЭПР σ_0 и звездную величину m КО при его наблюдении наземной ОЭС:

$$m = -2{,}5 \lg \left[54{,}35 \frac{\sigma_0 \gamma_{\text{атм}}}{R^2} \int\limits_{(\Delta\lambda)} V(\lambda) H_{\text{КО}e}(\lambda) d\lambda \right] - 14{,}18, \tag{14}$$

$$\sigma_0 = 0{,}0184 \frac{R^2}{\gamma_{\text{атм}}} 10^{-0{,}4(m+14{,}18)} \left[\int\limits_{(\Delta\lambda)} V(\lambda) H_{\text{КО}e}(\lambda) d\lambda \right]^{-1}. \tag{15}$$

В соответствии с выражениями (14) и (15) были рассчитаны зависимости, приведенные на рис. 1–3. Рассматривалась регистрация потока излучения от наблюдаемого КО в диапазоне длин волн $\Delta\lambda$ видимого диапазона оптического излучения $0{,}38 < \lambda < 0{,}78$ мкм, что соответствует регистрации в ОЭС интегральных ФКБ.

На рис. 1 приведены зависимости величины блеска КО m от дальности наблюдения $R_{КО}$ при различных значениях ЭПР КО σ_0. Кривая 1 соответствует $\sigma_0 = 0{,}5$ м^2, кривая 2 – $\sigma_0 = 1$ м^2, кривая 3 – $\sigma_0 = 2$ м^2, кривая 4 – $\sigma_0 = 4$ м^2.

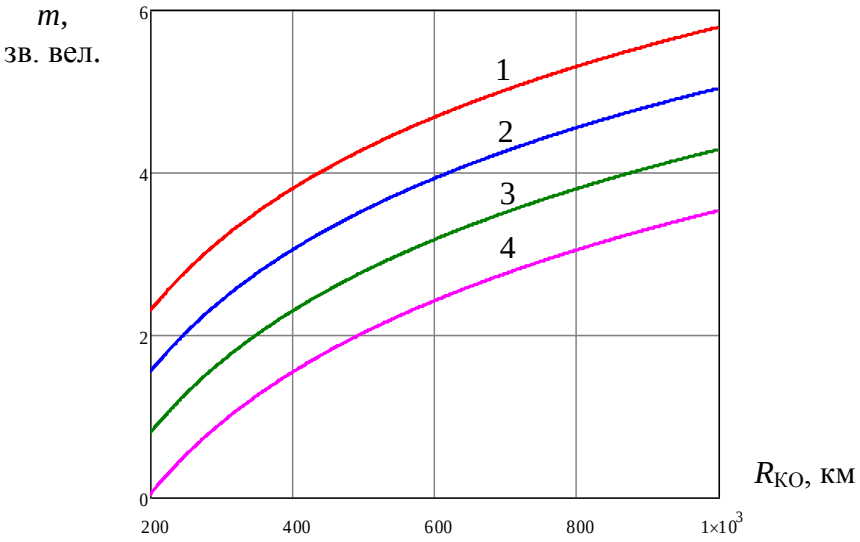


Рис. 1. Зависимость блеска КО от дальности наблюдения при фиксированной ЭПР КО

На рис. 2 приведены зависимости ЭПР КО σ_0 от величины его блеска m при различных значениях дальности наблюдения $R_{КО}$. Кривая 1 соответствует $R_{КО} = 400$ км, кривая 2 – $R_{КО} = 600$ км, кривая 3 – $R_{КО} = 800$ км, кривая 4 – $R_{КО} = 1000$ км. Чем ярче КО, тем больше его ЭПР и тем меньше его звездная величина.

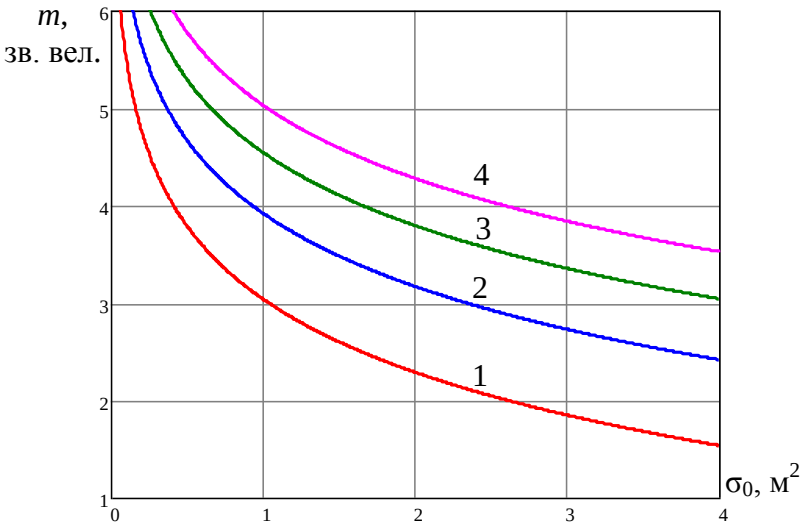


Рис. 2. Зависимость блеска КО от его ЭПР при фиксированной дальности наблюдения

Выражение (13) также позволяет выразить дальность наблюдения $R_{КО}$, на которой КО с ЭПР σ_0 имеет видимый блеск m:

$$R_{КО} = \sqrt{54{,}35\sigma_0\gamma_{атм}10^{-0{,}4(m+14{,}18)}\int\limits_{(\Delta\lambda)} V(\lambda)H_{КОe}(\lambda)d\lambda} \quad . \qquad (16)$$

На рис. 3 приведены рассчитанные согласно выражению (16) зависимости дальности наблюдения $R_{КО}$ от ЭПР КО σ_0 при различных значениях блеска КО m, показывающие, какую звездную величину блеска m имеет КО с ЭПР σ_0, наблюдаемый на дальности $R_{КО}$. Кривая 1 соответствует блеску $m = 3$, кривая 2 – блеску $m = 4$, кривая 3 – блеску $m = 5$, кривая 4 – блеску $m = 6$. На основе определения звездной величины с увеличением ЭПР КО при фиксированной дальности наблюдения его звездная величина уменьшается.

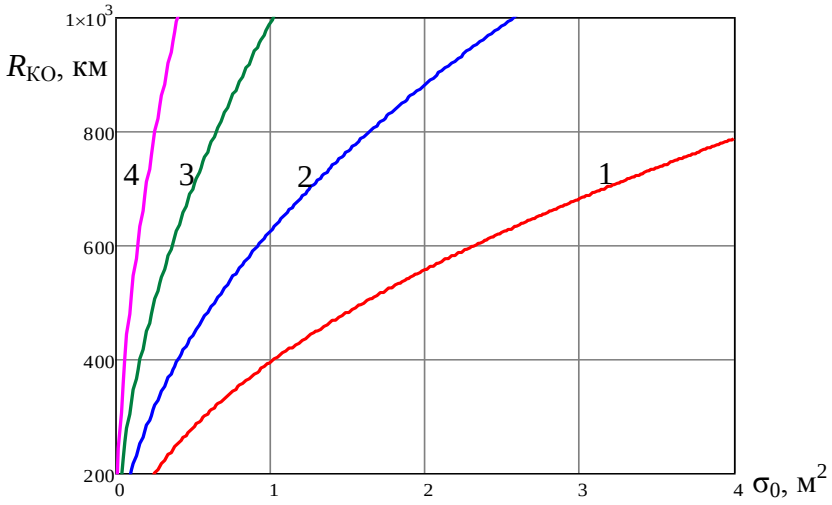


Рис. 3. Зависимость дальности наблюдения КО от его ЭПР при фиксированной величине блеска КО

Представленные результаты иллюстрируют взаимосвязь фотометрических и энергетических характеристик принимаемого наземной ОЭС оптического излучения от наблюдаемого КО при регистрации интегрального потока излучения во всем видимом диапазоне длин волн. Приведенные выражения могут быть положены в основу моделей наблюдения КО наземными ОЭС [15]. Уточнение этих выражений возможно при задании конкретных ЭПР КО с учетом их формы, условий наблюдения и подсветки и спектральных характеристик коэффициентов отражения покрытий. При соответствующем задании анализируемой полосы длин волн $\Delta\lambda$, для которой определяется световой поток излучения, принимаемого от КО, рассмотренная методика может быть распространена на ОЭС, регистрирующие спектрофотометрическую информацию – ФКБ КО в отдельных спектральных диапазонах [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика последовательного пересчета фотометрических характеристик в энергетические характеристики наблюдаемых КО позволяет устранить разрыв между астрономической практикой представления данных и потребностями моделирования условий наблюдения КО при решении задач мониторинга ОКП. Приведенные аналитические выражения позволяют перейти от задаваемых оценок блеска КО к количественному анализу энергетических характеристик условий наблюдения КО наземными ОЭС и параметров КО, что необходимо для оценки возможностей наблюдения КО и разработки алгоритмов их классификации. При этом возможности решения прикладных задач мониторинга ОКП наземными ОЭС определяют именно энергетические характеристики условий наблюдения КА.

Дальнейшее исследование условий наблюдения КО наземными ОЭС планируется проводить для случая приема в ОЭС оптического излучения в отдельных диапазонах длин волн,

что соответствует переходу от регистрации интегральных ФКБ наблюдаемых КО к регистрации ФКБ в отдельных спектральных диапазонах, т.е. спектрофотометрической информации.

Список использованных источников

1. *Муртазов А. К.* Мониторинг загрязнений околоземного космического пространства оптическими средствами. – Рязань : РГУ, 2010. – 248 с.

2. *Ипатов А. В., Ведешин Л. А.* Дистанционные, оптические и радиолокационные наблюдения за космическим пространством // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2022. – № 62. – С. 10–14.

3. *Олейников И. И., Архипов С. А., Тунгушпаев А. Т.* Перспективная космическая система наблюдения космических объектов в околоземном космическом пространстве оптико-электронными средствами // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 4. – С. 14–20.

4. *Олейников М. И.* Методика определения оптических характеристик элементов конструкции КА сложной формы по результатам наземных фотометрических наблюдений // I-methods. – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 8–12.

5. *Мальцев Г. Н., Нахов С. А.* Информационные возможности и приоритетные направления применения наземных оптико-электронных систем наблюдения космических объектов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2025. – Вып. 696. – С. 148–154.

6. *Миронов А. В.* Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии звезд. – М. : Физматлит, 2008. – 260 с.

7. *Якушенков Ю. Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М. : Логос, 2011. – 568 с.

8. *Пророк В.Я., Карытко А. А., Горянский А. С.* Методика расчета блеска космического объекта // I-methods. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 11–18.

9. *Пророк В. Я., Волков Д. В., Коротков А. О.* Исследование фотометрических характеристик космических объектов, их обработка и интерпретация // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2026. – № 1. – С. 29–35.

10. *Ахметьянов В. Р., Лутов И. О., Олейников М. И.* Метод оптико-геометрического моделирования в задаче определения габаритных и отражательных характеристик космических аппаратов // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 4. – С. 1–18.

11. *Федоренко Д. С., Легков К. Е.* Моделирование спектра отражения высокоорбитального искусственного спутника Земли // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2020. – Т. 14, № 11. – С. 14–20.

12. *Лебедько Е. Г.* Системы импульсной оптической локации. – М. : Лань, 2014. – 365 с.

13. *Зайцева Е. В*. Погрешности аппроксимации усредненных кривых видности при определении освещенности оптического изображения // Доклады ТУСУРа. – 2020. – № 1 (21). – Ч. 2. – С. 69–73.

14. *Мартынов Д. Я.* Курс практической астрофизики : для ун-тов. – 3-е изд., перераб. – М. : Наука, 1977. – 544 с.

15. *Коломийцев Е. Г., Колинько В. И., Сауткин В. А.* Разработка структурной схемы математических моделей работы оптического телескопа для наблюдения удаленных объектов // Контенант. – 2015. – № 4. – С. 6–27.

16. *Жуков А. О., Логунов С. В.* Способ определения конструктивных особенностей космических объектов по спектральным характеристикам // Нелинейный мир. – 2013. – Т. 11, № 8. – С. 554–558.

17. *Логунов С. В*. Расширение фотометрического портрета геостационарного искусственного космического объекта на основе спектрофотометрической информации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2024. – Вып. 694. – С. 83–92.

А. Н. Миронов,
доктор технических наук, профессор;
Р. А. Ситков,
кандидат технических наук

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПУНКТА РАЗМЕЩЕНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Существующие методы обоснования выбора пунктов размещения объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) фрагментарны и не обеспечивают прямой количественный учет влияния разнородных факторов на эффективность функционирования размещаемых объектов. Впервые предложена методология, синтезирующая аппарат теории эффективности целенаправленных процессов и методы квалиметрии, что позволяет преобразовать требования к эффективности ОНКИ в формализованный вектор показателей и оценить его через дерево показателей качества. В отличие от традиционных подходов, методология устанавливает прямую количественную связь между параметрами среды и конечной эффективностью объекта посредством математической модели эффективности функционирования. Анализ адаптивных механизмов коррекции весовых коэффициентов выявил системные ограничения, связанные со структурой данных, субъективностью решений и влиянием внесистемных факторов. Предложена методология с фиксированными весами, обеспечивающая объективность, воспроизводимость и прозрачность решений, включающая формализованный алгоритм выбора и механизм анализа отклонений. Практическая значимость – создание инструментария для системного аудита и совершенствования процесса размещения ОНКИ и других сложных технических систем.

Ключевые слова: системный подход, рациональный выбор, теория эффективности, квалиметрия, дерево показателей качества, наземная космическая инфраструктура.

ВВЕДЕНИЕ

Выбор пункта размещения ОНКИ относится к классу стратегических решений, определяющих эффективность и экономическую целесообразность функционирования сложных, территориально распределенных технических систем, в состав которых они входят (например, мониторинга космического пространства), на протяжении всего их жизненного цикла. Актуальность данной проблемы многократно возрастает в условиях развертывания новых масштабных программ, таких как «Космос», где ошибка выбора локации может привести к критическому снижению эффективности реализуемых проектов.

Анализ современного состояния вопроса позволяет уточнить ранее выявленные проблемы рекогносцировочных изысканий (РИ) [1]:

1. Фрагментарность существующего научно-методического аппарата. Отсутствие единой теоретической платформы, интегрирующей частные методики оценки разнородных факторов (технических, инфраструктурных, экономических, социальных и др.) в целостную систему принятия решений.

2. Невозможность обеспечения воспроизводимости и объективности результатов. Доминирование субъективных экспертных оценок и неформализованных процедур приводит к принципиальной невоспроизводимости решений, принимаемых разными рекогносцировочными комиссиями или даже одной комиссией в разное время.

3. Отсутствие прямой связи между условиями пункта размещения и эффективностью функционирования объекта. Существующие методы позволяют оценить отдельные параметры участка, но не дают ответа на ключевой вопрос о результирующей эффективности объекта при его размещении на данном участке.

4. Наличие фундаментального противоречия между разнородной природой значимых факторов и отсутствием научно обоснованного аппарата для их приведения к общему основанию и комплексной оценки.

5. Статичность и неадаптивность. Неспособность существующих методов к динамическому уточнению критериев выбора пункта размещения на основе накапливаемого опыта РИ и эксплуатации уже развернутых объектов.

Предыдущие исследования [1–3] носят несколько ограниченный характер, так как не содержат методов оценивания эффективности функционирования объектов при их размещении на местности, что не позволяет создать целостную методологию, обеспечивающую рациональный и обоснованный выбор.

Таким образом, целью данной работы является разработка методологии рационального выбора пунктов размещения ОНКИ на основе синтеза аппарата теории эффективности целенаправленных процессов [4] и методов квалиметрии [5, 6]. Предлагаемый подход направлен на преодоление указанных ограничений за счет создания методологии, обеспечивающей комплексный учет разнородных факторов, объективность и воспроизводимость результатов.

Научная новизна работы заключается в разработке принципов построения системы поддержки принятия решений, формализующей связь параметров внешней среды с показателями эффективности функционирования ОНКИ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретический базис синтеза

Методологический аппарат настоящего исследования сформирован для решения фундаментальной проблемы, выявленной при анализе современной практики РИ [1, 2]. Ключевой проблемой является методологический дуализм задачи выбора пункта размещения ОНКИ: с одной стороны, требуется оценить свойства материального объекта – земельного участка, с другой – показатели эффективности целевого процесса функционирования объекта, размещенного на этом участке. Ни один из существующих научных аппаратов не предназначен для одновременного решения обеих задач.

Для целеполагания и формализации требований к результативности привлекается аппарат теории эффективности целенаправленных процессов (ТЭЦП) [4]. Он формирует системные критерии, представляя эффективность как векторную величину, агрегирующую показатели результативности, оперативности и ресурсоемкости. ТЭЦП позволяет задать целевые или пороговые значения вектора показателей эффективности (ВПЭ), определяя тем самым, что оценивать. Однако данный аппарат не содержит инструментария для комплексной сравнительной оценки свойств самого участка.

Для комплексной оценки разнородных свойств участка используется аппарат квалиметрии [5, 6]. Он предлагает формальный математический инструментарий для приведения разнородных факторов к общему основанию, их нормирования и свертки в интегральный показатель на основе дерева показателей качества (ДПК). Таким образом, квалиметрия определяет, как оценивать, но не задает систему целей, вытекающую из эффективности функционирования объекта.

Изолированное применение каждого из аппаратов непригодно для решения целостной задачи. Их простое сложение также не преодолевает дуализм, оставляя разрозненными целеполагание и процедуру оценки. Для преодоления этого противоречия требуется конструктивное объединение, порождающее новое системное качество.

В данной работе под синтезом аппаратов ТЭЦП и квалиметрии понимается такое их объединение, которое порождает эмерджентное свойство. Критерием, отличающим такой синтез от простого сложения методов, является возникновение способности методологии обеспечивать эффективность функционирования ОНКИ при одновременном учете сопутствующих факторов размещения.

В разработанной методологии это эмерджентное свойство реализуется через механизм последовательной некомпенсируемой фильтрации, воплощающий принцип примата эффективности. Данный механизм обеспечивает безусловный приоритет достижения пороговых значений ВПЭ (задача ТЭЦП) в рамках процедуры комплексной сравнительной оценки всех прочих факторов размещения (задача квалиметрии).

Таким образом, синтез порождает новую логику принятия решений, не сводимую к простому совместному использованию исходных аппаратов. Ни ТЭЦП [4], ни квалиметрия [5, 6] по отдельности не содержат и не порождают процедуры гарантированного обеспечения целевой эффективности при комплексном учете условий размещения. Возникновение этого свойства подтверждает синтетическую природу разработанной методологии рационального выбора, что позволяет преодолеть исходный методологический дуализм и сформировать теоретический базис для построения эталонной, объективной и воспроизводимой процедуры выбора пунктов размещения ОНКИ.

Принципы построения методологии

Предлагаемая методология реализуется в виде следующей последовательности шагов.

1. Формирование вектора показателей эффективности. На основе анализа целевых задач объекта формируется структурированный перечень требований к его функционированию. Для ОНКИ на примере оптико-электронных средств космического назначения (ОЭС КН) мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) ВПЭ включает:

а) вектор параметров результативности (ВПР) – продолжительность интервала времени, в течение которого астроклиматические условия пункта размещения позволят обеспечить требуемую вероятность обнаружения космического объекта заданного размера и блеска на орбите с заданными параметрами;

б) вектор параметров оперативности (ВПО) – время экспозиции, необходимое для уверенного обнаружения/идентификации космического объекта с заданными параметрами;

в) вектор параметров затрат (ВПЗ) – затраты на строительство и эксплуатацию объекта.

В рамках ТЭЦП, вместо ВПЗ должен рассматриваться вектор параметров ресурсоемкости (ВПРс), включающий в себя все расходуемые в процессе функционирования сложной технической системы ресурсы, в том числе трудовые, временные и прочие, однако корректный учет этих видов ресурсов представляет значительные методологические сложности, поэтому в раках настоящего исследования ВПРс редуцирован до ВПЗ.

2. Формирование вектора условий размещения. На основе анализа требований нормативно-правовых и нормативно-технических документов, а также практического опыта проведения рекогносцировочных изысканий формируются требования к условиям пункта размещения объекта в виде вектора условий размещения (ВУР), который включает:

а) вектор показателей безопасности (ВПБ) – военной, криминальной, природной, техногенной;

б) вектор показателей транспортной доступности (ВПТД) – удаленность от терминалов железнодорожного, воздушного, водного транспорта, связность участка с автодорожной сетью РФ;

в) вектор показателей социальных условий (ВПСУ) – социальные условия места расквартирования персонала объекта, удаленность места расквартирования от центров социальной инфраструктуры.

3. Формализация факторов в дереве показателей качества. Строится иерархическая структура, верхний уровень которой представляет собой интегральный показатель качества (ИПК). Нижележащие уровни детализируют все значимые разнородные факторы: ВПЭ, ВУР, а также ограничения. Таким образом, ДПК становится формальной моделью, связывающей параметры пункта размещения с конечной эффективностью объекта.

4. Нормализация оценок. Для каждого показателя качества (ПК) в ДПК разрабатывается методика его оценки и нормализации. Для количественных показателей нормализация проводится по следующим формулам:

– для растущих показателей

$$K_i = \frac{q_i - q_{\text{бр}}}{q_{\text{эт}} - q_{\text{бр}}}, \quad (1)$$

где q_i – значение i-го ПК;
$q_{\text{эт}}$ – эталонное (наилучшее возможное) значение i-го ПК;
$q_{\text{бр}}$ – браковочное (недопустимое) значение i-го ПК;

– для убывающих показателей

$$K_i = \frac{q_{\text{бр}} - q_i}{q_{\text{бр}} - q_{\text{эт}}}. \quad (2)$$

Для качественных показателей применяются экспертные балльные шкалы с последующей нормализацией.

5. Свертка в интегральный показатель качества. Нормализованные оценки свертываются от нижнего уровня ДПК к корню с использованием взвешенной аддитивной свертки

$$K_\Sigma = \sum_i^n W_i K_i; \quad (3)$$

где K_i – относительная оценка i-го показателя качества;
W_i – вес i-го показателя качества (ПК),

или иного подхода, адекватного задаче.

АРХИТЕТУРА И КОМПОНЕНТЫ МЕТОДОЛОГИИ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ПУНКТОВ РАЗМЕЩЕНИЯ

Универсальная архитектура методологии

В результате проведенного исследования разработана архитектура методологии рационального выбора, представленная на рис. 1. Архитектура реализует последовательный принцип обработки данных, формализующий этапы работы с массивом участков-кандидатов:

Уровень 1 (фильтрация по абсолютным ограничениям). На вход подается исходный массив участков-кандидатов. На данном этапе осуществляется проверка соответствия каждого участка абсолютным ограничениям (правовым, природным, техногенным, геотехническим). Участки, не прошедшие фильтрацию, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Результатом работы блока является массив участков, допустимых для размещения.

Уровень 2 (моделирование и фильтрация по ВПЭ). Для каждого участка из массива, полученного на предыдущем этапе, осуществляется расчет ВПЭ через систему физико-математических моделей функционирования объекта. Данный блок является специфичным для каждого класса объектов и преобразует входные параметры (вектор конструктивных параметров (ВКП) объекта, вектор параметров среды (ВПС) пункта размещения) в количественные значения результативности, оперативности и ресурсоемкости. Полученные значения ВПЭ сравниваются с пороговыми (браковочными) значениями. Участки, не обеспечивающие требуемый уровень эффективности, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Результатом работы блока является массив участков, обеспечивающих требуемую эффективность функционирования.

Уровень 3 (квалиметрическая оценка и ранжирование). Для каждого участка из результирующего массива блока 2 осуществляется расчет ИПК. Данный блок реализует приведение к общему основанию всех разнородных факторов (ВПЭ, ВУР) через построение ДПК, нормализацию частных показателей и их свертку. Результатом работы блока является массив участков, упорядоченный по убыванию ИПК, что обеспечивает объективную основу для выбора оптимального решения.

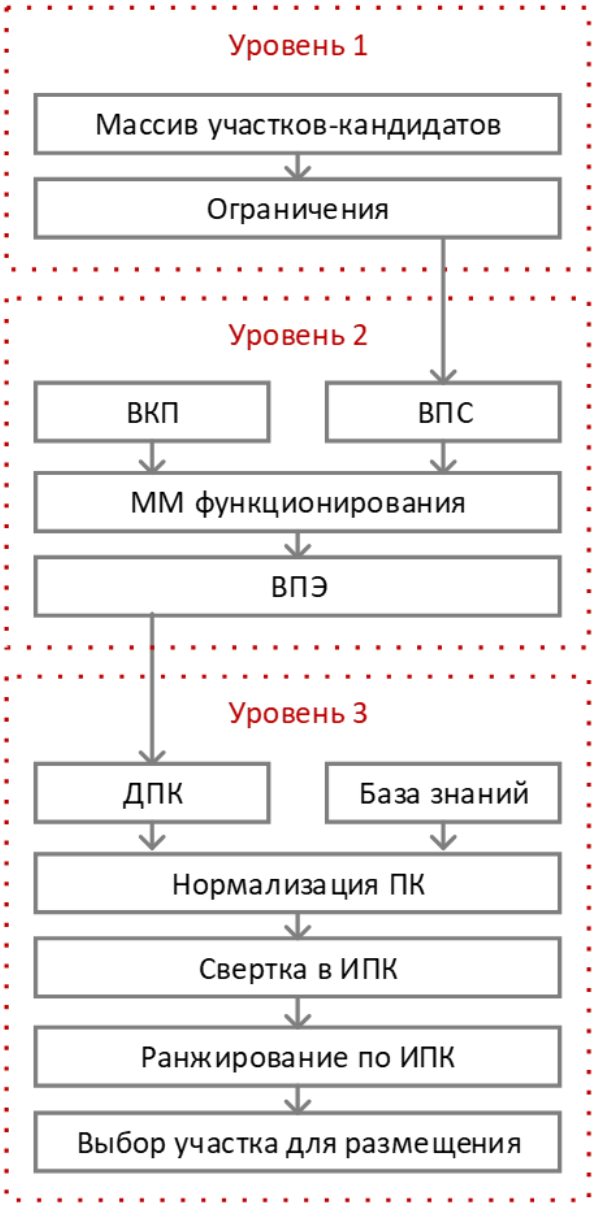


Рис. 1. Архитектура методологии рационального выбора

Представленная архитектура является универсальной и может быть адаптирована для различных классов технических систем путем разработки соответствующих моделей функционирования и адаптации структуры ДПК.

Структура дерева показателей качества участка

Разработана типовая структура ДПК для ОНКИ, главным свойством которого является его иерархичность и ориентация на обеспечение эффективности функционирования (рис. 2).



Рис. 2. Дерево показателей качества, характеризующих пригодность участка для размещения объекта

Корневым элементом дерева является ИПК участка. На втором уровне расположены три агрегированных группы показателей: Ограничения, ВПЭ и ВУР. Нижележащие уровни детализируют каждый показатель до показателей качества, которые могут быть непосредственно измерены или рассчитаны (угол турбуленции, уровень фоновой засветки, удаленность от железнодорожной станции и пр.).

Сравнительный анализ механизмов коррекции весовых коэффициентов: эталонный статический подход против адаптивных методов

В рамках разработки методологии рационального выбора закономерно возник вопрос о механизме определения и возможной коррекции весовых коэффициентов показателей качества. Теоретический интерес представляет возможность использования для решения этой задачи адаптивного байесовского подхода, основанного на последовательном обновлении апостериорного распределения весов по мере накопления данных.

Однако всесторонний анализ практических условий проведения РИ выявил системные ограничения, снижающие реализуемость адаптивных механизмов в текущих условиях. Детальное рассмотрение проблемы позволило идентифицировать четыре ключевых фактора, ограничивающих практическое применение алгоритмов адаптивного обучения.

1. Принципиальное несоответствие структуры данных задачам адаптивного обучения. Несмотря на то, что в рамках реализации масштабных программ (таких как «Космос») общее количество РИ может исчисляться десятками и даже сотнями, ключевой проблемой является не столько объем данных, сколько их структура и информационная емкость. Для надежной байесовской оценки весовых коэффициентов требуется не просто большое количество наборов данных, а репрезентативное покрытие всего многомерного пространства признаков ВУР. На практике же множество РИ проводится на ограниченном числе перспективных площадок, что приводит к кластеризации данных в пространстве параметров. В результате алгоритм

адаптивного обучения оказывается способен выучить лишь локальные зависимости, характерные для конкретных, уже обследованных типов местности, но не глобальные, обобщаемые «истинные» предпочтения. Это лишает адаптацию смысла, так как система будет подстраиваться под историю решений, а не выявлять объективные закономерности, что делает оценки весов крайне неустойчивыми к появлению данных с новой, ранее не исследованной площадки.

2. Изменчивость субъектного фактора принятия решений. Частая ротация личного состава рекогносцировочных комиссий приводит к тому, что каждое новое лицо, принимающее решение (ЛПР), привносит собственную систему предпочтений и функцию полезности (часто не явную). В результате данные, накопленные от разных комиссий, оказываются статистически несопоставимыми, так как отражают не объективные закономерности, а изменчивые субъективные предпочтения разных групп людей.

3. Существенный вклад нерациональных и внесистемных факторов в окончательный выбор. Значительная часть решений на практике принимается вопреки формальным критериям под влиянием факторов, не учтенных в ДПК. К ним относятся административное давление, ведомственный консерватизм (предпочтение уже освоенных районов), а также банальное стремление упростить себе задачу. Эти факторы вносят в данные значительный «шум» и систематические смещения, которые адаптивный алгоритм интерпретировал бы как изменение «истинных» предпочтений, что приводило бы к ложным выводам.

4. Отсутствие устойчивости предпочтений во времени. Даже у одного и того же ЛПР ценностные ориентации и весовые коэффициенты могут колебаться под влиянием внешних обстоятельств, изменения политической, экономической, административной или иной конъюнктуры. Это делает задачу поиска неких «истинных» весов, к которым должна сходиться адаптивная система, малореализуемой на практике.

Таким образом, несмотря на формальную математическую корректность, применение адаптивных механизмов в описанных условиях привело бы не к объективизации процесса принятия решений, а, напротив, к его дополнительной субъективизации, так как алгоритм начинал бы воспроизводить и усиливать случайные колебания и систематические ошибки, присутствующие в малой и зашумленной выборке данных.

Алгоритм рационального выбора

Разработан формализованный алгоритм выбора, который в укрупненном виде представлен следующими шагами.

Фильтрация участков по абсолютным ограничениям. Из всего множества участков-кандидатов исключаются те, которые не соответствуют хотя бы одному абсолютному ограничению (правовому, природному, техногенному, геотехническому). Результатом является множество допустимых участков.

Фильтрация участков по ВПЭ. Оставшиеся участки оцениваются на предмет обеспечения требуемого уровня эффективности функционирования при размещении на них ОЭС КН. Участки, на которых требуемый уровень эффективности не обеспечивается, также исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Расчет ИПК для каждого допустимого участка. Для каждого допустимого участка осуществляется:

– расчет показателей ВПЭ (результативности, оперативности и ресурсоемкости) через модели функционирования;

– нормализация всех показателей ДПК;

– расчет ИПК путем взвешенной аддитивной свертки.

Ранжирование и выбор. Все допустимые участки ранжируются по убыванию ИПК. Наиболее предпочтительным считается участок с максимальным значением ИПК.

Сравнительный анализ

Проведем сравнительный анализ предлагаемой методологии с традиционными подходами (экспертные оценки, стоимостной анализ) по ключевым критериям (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ методов обоснования выбора пункта размещения

Критерий	Экспертный подход	Стоимостной анализ	Предлагаемая методология
Учет эффективности	Качественно	Опосредованно	Прямой количественный
Объективность	Низкая	Средняя	Высокая
Воспроизводимость	Низкая	Высокая	Высокая
Комплексность учета	Избирательная	Низкая	Высокая

Анализ наглядно демонстрирует, что предлагаемая методология превосходит традиционные подходы по всем ключевым критериям, обеспечивая прямой учет эффективности функционирования, высокую объективность и воспроизводимость результатов.

АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И ОГРАНИЧЕНИЙ МЕТОДОЛОГИИ

Интерпретация результатов и преимущества подхода

Разработанная методология представляет собой целостный аппарат для решения задачи, которая традиционно решалась на основе интуиции и узкоспециализированных, разрозненных оценок. Ключевое преимущество предложенного подхода заключается в системности. Синтез теории эффективности и квалиметрии позволил создать не просто еще один алгоритм сравнения, а методологию, которая позволяет:

1) трансформировать требования к обеспечению эффективности функционирования сложных технических систем, к которым относятся ОНКИ, в измеримые и сопоставимые критерии;

2) обеспечивать прямую количественную связь между параметрами среды и конечной эффективностью объекта через физико-математические модели, что кардинально повышает объективность оценки астроклиматических и иных специальных факторов по сравнению с экспертными оценками;

3) обеспечивать прозрачность и воспроизводимость процесса принятия решения, поскольку каждое решение может быть верифицировано путем повторного прохода по алгоритму с теми же исходными данными.

Сравнение с существующими подходами и значимость

Как показал сравнительный анализ (табл. 1), предложенный подход не является эволюционным улучшением, а представляет собой качественный скачок. Он снимает ключевое противоречие между разнородностью факторов и необходимостью их интегральной оценки. Если традиционные методы оперируют либо только стоимостными показателями, либо каче-

ственными экспертными суждениями, то данная методология оперирует нормализованными безразмерными оценками, имеющими четкую интерпретацию, через призму эффективности функционирования.

Ограничения методологии и направления дальнейших исследований

Основное ограничение методологии на текущем этапе связано с трудоемкостью разработки детализированных и верифицированных математических моделей функционирования для каждого конкретного типа объекта. Кроме того, иерархическая структура ДПК, несмотря на свою наглядность, не учитывает потенциальные перекрестные корреляции между разнородными показателями разных уровней.

Данные ограничения являются источником для дальнейших исследований и определяют следующие перспективные направления:

1) разработку типовых библиотек моделей и интеграцию с аппаратом квалиметрии поли-модельных комплексов. Как показано в работе [6], магистральным направлением является развитие методологии в сторону создания адаптивных поли-модельных комплексов. Это подразумевает не только создание библиотек верифицированных моделей для различных классов ОНКИ, но и разработку механизмов квалиметрической оценки адекватности, точности и вычислительной эффективности самих моделей в рамках методики, что позволит реализовать принцип «модель-ориентированного проектирования» для задач размещения и кардинально повысит достоверность получаемых результатов;

2) исследование методов учета сложных взаимосвязей и развития алгоритмического аппарата. Перспективным направлением является преодоление ограничений иерархического ДПК за счет исследования и применения более сложных агрегаторов и структур (например, нечеткие когнитивные карты, байесовские сети), позволяющих учесть перекрестные корреляции между разноуровневыми факторами. Также требует дальнейшего изучения сравнение различных методов адаптивного уточнения весовых коэффициентов (байесовские методы, нейросетевые подходы) для выявления наиболее эффективных в условиях ограниченных данных;

3) разработку программного комплекса с элементами искусственного интеллекта, а также реализацию предложенной архитектуры в виде модульного программного обеспечения, позволяющего подключать различные модели и алгоритмы расчета. Долгосрочной целью является создание самонастраивающейся киберфизической системы поддержки принятия решений, способной к динамическому выбору оптимальных моделей и алгоритмов в зависимости от условий конкретной задачи.

Практическая значимость и область применения

Предложенная методология не ограничивается областью размещения ОНКИ. Она применима для любого класса сложных технических систем, эффективность функционирования которых критически зависит от параметров внешней среды и инфраструктурных условий. К таким системам могут быть отнесены радиолокационные станции, радиотехнические комплексы и др.

Таким образом, работа закладывает основу для создания нового класса систем поддержки принятия решений, основанных на принципах рациональности, объективности и достоверности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработан и методологически обоснован новый системный подход к решению задачи выбора пункта размещения ОНКИ. Его основу составляет синтез аппарата теории эффективности целенаправленных процессов и методов квалиметрии.

Главным результатом работы является создание целостной методологии рационального выбора, включающей универсальную архитектуру, принципы построения деревьев показателей качества и формализованный алгоритм рационального выбора, обеспечивающий воспроизводимость и объективность решений.

Установлено, что предложенный подход принципиально превосходит существующие экспертные и стоимостные методы по ключевым критериям: учету эффективности функционирования, объективности, воспроизводимости и комплексности.

Научная новизна работы заключается в разработке принципов формализации связи разнородных факторов с показателями эффективности функционирования и в создании механизма их интегральной оценки на единой методологической основе.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной методологии для обоснования решений по размещению не только ОНКИ, но и других классов сложных технических систем, что определяет широкую область ее применения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с наполнением методологии конкретным содержанием: разработкой детализированных моделей функционирования для различных типов систем, совершенствованием механизмов адаптации и созданием программных инструментов для ее реализации.

Список использованных источников

1. Анализ современной практики проведения рекогносцировочных изысканий и выбора участка под строительство объектов специального назначения / Р. А. Ситков [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-4. – С. 717–721.

2. *Ситков Р. А., Рыжий Н. В.* Методика и критерии выбора участков при проведении рекогносцировочных изысканий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 307–313. – DOI : 10.24412/2071-6168-2022-12-307-313.

3. *Ситков Р. А., Ситников А. В., Тюрин Е. А.* Алгоритм предварительного выбора земельных участков при проведении рекогносцировочных изысканий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 7. – С. 293–300.

4. *Петухов Г. Б., Якунин В. И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М. : АСТ, 2006. – 504 с.

5. *Азгальдов Г. Г., Костин А. В., Садовов В. В.* Квалиметрия для всех : учеб. пособие. – М. : ИД ИнформЗнание, 2012. – 165 с.

6. *Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов : моногр. – М. : РАН, 2018. – 314 с. – DOI : 10.31857/S9785907036321000001.

А. М. Полетаев
кандидат технических наук, доцент

РАДИОЛОКАЦИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Представлен систематизированный обзор организационно-технических и экономических тенденций, связанных с разработкой и применением космических средств радиолокационного наблюдения. Проанализированы особенности современных способов реализации бортовых антенных систем и тенденции по их разработке в среднесрочной перспективе.

Ключевые слова: прибор дистанционного зондирования Земли, космический радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, орбитальная группировка, антенная система.

ВВЕДЕНИЕ

Информативность данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) определяется степенью решения тематических задач потребителей и в большинстве случаев зависит от уровня реализации их требований к целевым показателям космических систем (КС) ДЗЗ [2, 3]:

– пространственным характеристикам (разрешающей способности по координатам (в плане и по высоте) и по скорости, к погрешности определения координат и скорости, размеру наблюдаемого участка (УПЗ) поверхности Земли (ПЗ) (ширины и длины полосы наблюдения));

– радиометрическим характеристикам (динамическому диапазону, радиометрической чувствительности и разрешающей способности данных ДЗЗ (ДДЗЗ));

– временным характеристикам (длительности съемки на витке орбиты, периодичности наблюдения требуемых УПЗ, длительности обработки ДДЗЗ и их представления потребителям).

К основным уникальным возможностям радиолокационных (РЛ) приборов ДЗЗ (ПДЗЗ) и преимуществам перед пассивными, в частности, оптико-электронными (ОЭ), ПДЗЗ относятся:

– практическая независимость результатов РЛ наблюдения (РЛН) от условий освещенности УПЗ и облачности (как следствие, возможность рационального выбора баллистических структур (БС) КС ДЗЗ и отказа от комплексирования со средствами метеорологического обеспечения);

– более широкий набор измеряемых временных и пространственных параметров электромагнитного поля (ПЭМП), включая фазу при когерентной обработке и два параметра, определяющих поляризацию, из-за проведения контроля излучаемых сигналов [как следствие, возможность получения более высокой пространственной (по трем координатам), спектральной, радиометрической и поляризационной разрешающей способности и точной пространственной привязки формируемых ДДЗЗ];

– ситуационная гибкость применения РЛ ПДЗЗ как способность к измерению требуемого набора прямых и косвенных признаков ОПЗ путем адекватного изменения ПЭМП (частоты, ширины спектра, временного интервала приема и поляризации сигналов, углов РЛН, амплитуды для управления отношением сигнал/шум) при соответствующей антенне программно-алгоритмическим, а не аппаратным способом, характерным для ОЭ ПДЗЗ;

– чувствительность к физическим и электромагнитным свойствам объектов УПЗ (ОПЗ) (шероховатость и комплексная диэлектрическая проницаемость приповерхностного слоя УПЗ; размер и ориентация ОПЗ относительно локального угла падения ЭМП и т. д.) в отличие от тепловых и химических свойств, регистрируемых ОЭ ПДЗЗ (как следствие, возможность получения набора некоррелированных ДДЗЗ по наблюдаемому УПЗ);

– более простая регистрация доплеровских эффектов (как следствие, возможность определения параметров движения площадных и точечных ОПЗ, например, естественных (морских и речных течений) и искусственных ОПЗ соответственно, за период однократного РЛН).

Вышеуказанные преимущества и обусловили приоритетную роль РЛ ПДЗЗ в структуре КС ДЗЗ информационного обеспечения целевых групп потребителей. Анализ открытых публикаций показывает [7–17, 19, 20, 22], что по состоянию на 15.03.2025 РЛ ПДЗЗ различных типов установлены на 326 космических аппаратах [из ~11200 действующих космических аппаратов (КА) с исключением межпланетных] 18 государств и сообществ, что составляет до 14% от мировой орбитальной группировки (ОГ) КА ДЗЗ с соизмеримым пространственным разрешением ДДЗЗ (рис. 1). При этом преобладает доля (61%) радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (КРСА) над другими типами РЛ ПДЗЗ [высотомерами (РЛВ), скаттерометрами (РЛСк), профилемерами (РЛП), системами (РЛС) бокового обзора (БО)]. Предоставляемые ими РЛ ДДЗЗ в различных режимах РЛН (РРЛН) используются для решения большинства тематических задач ДЗЗ (табл. 1).

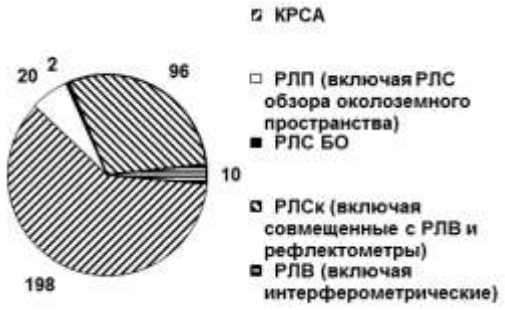


Рис. 1. Текущее распределение РЛ ПДЗЗ

Таблица 1

Типовые РЛ ПДЗЗ и их характеристики

Виды РЛ ПДЗЗ и типовые РРЛН	Типовые характеристики РЛ ДДЗЗ		
КРСА (дополнительно различаются по числу реализуемых поляризационных каналов на излучение и на прием)	Ширина полосы РЛН (поперек трассы КА), км	Радиометрическое разрешение, дБ	Пространственное разрешение, м / разрешение по скорости, м/с
РЛВ (типовые/интерферометрические)	2–10/100–180	–	0,02 (по высоте)/-
РЛП (исследования тропосферы)	0–20 (по высоте)	–	250–600 (по высоте)/-
РЛСк	1000–1500	–	10–40 км/1–2
РЛС БО	500–750	0,5–1	500–1000/-
КРСА: *когерентные РРЛН*			
Прожекторный (детальный) Spotlight	3÷10 x 3÷10	3	0,16–0,7/-
Прожекторный скользящий Sliding Spotlight	10÷15 x 10÷15	3	0,5–1/-
Полосовой (маршрутный) Stripmap	20–120	2–3	1,5–5/-
Широкополосный (обзорный) ScanSAR	300–500	1–2	15–150/-
Широкополосный (детальный) TOPSAR	200–300	1–2	5–20/-
Поперечный интерферометрический (формирование цифровых матриц рельефа) InSAR	30–90	–	12–30 (по высоте 1–4 м) /-
Продольный интерферометрический (определение скорости ОПЗ) MTI	20–100	–	-/1–2
Волновой режим Wave	20 x 20	1–1,5	5
КРСА: *некогерентный РРЛН*			
Наблюдение морских акваторий Maritime/ Ocean Surveillance	500–750	0,5–1	500–1000

Представляется целесообразным и актуальным провести анализ проявившихся тенденций в разработке и применении РЛ ПДЗЗ, которые будут определять динамику их развития в среднесрочной перспективе.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОБЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ В РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ ДЛЯ АКТИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В соответствии с частотным регламентом комиссии по радиосвязи Международного телекоммуникационного союза ITU-R для спутниковых служб исследования Земли (ССИЗ) и космических исследований (СКИ) с целью активного РЛН из космоса выделено 15 диапазонов. Согласно рекомендации ITU-R RS.1859 м-/дм-диапазоны (VHF, P, L) преимущественно используются для подповерхностного ДЗЗ, см-диапазон (S, C, X, Ku, K) – для наблюдения ОПЗ, а мм-диапазон – для наблюдения процессов в атмосфере [6, 9]. Частотный диапазон, выбираемый для РЛ ПДЗЗ, прямо определяет типовые решаемые тематические задачи ДЗЗ и косвенно – массово-габаритные характеристики КА, потому что с увеличением длины волны увеличиваются размеры и вес бортовой антенной системы (АС). Статус диапазона (первичный/вторичный) и его ширина, а также его совместное использование средствами других радиослужб предопределяют возникновение ситуаций с постановкой непреднамеренных помех – в основном от наземных РЛС и КРСА того же диапазона при РЛН одного УПЗ. С другой стороны, широкополосность АС и возможность перестройки рабочих частот до 10% без существенных потерь направленных свойств АС большинства РЛ ПДЗЗ позволяет реализовывать РЛН в различных вариантах и в соседних диапазонах:

а) путем приема сигналов, отраженных от УПЗ, орбитальных средств радиослужб фиксированной связи и спутниковой радионавигационной службы («многопозиционное РЛН»);

б) путем приема сигналов от наземных и/или орбитальных средств («РЛН на просвет»).

Вслед за решением R-ACT-WRC.11-2015 всемирной конференции по радиосвязи WRC-2015 (*World Radio Conference*), кардинально увеличившим X-диапазон до 1200 МГц для РЛ ДЗЗ, конференция WRC-2023 также утвердила ряд значимых резолюций и решений (рис. 2):

1. COM 5/6 – ввести диапазон 40–50 МГц на вторичной основе. Очевидно, что это решение вызвано положительными результатами применения совмещенных РЛ ПДЗЗ дкм-/м-диапазонов на КА исследования планет и астероидов (ЕС – Mars Express, Rosetta, Juventas, Juice; США – Mars Reconnaissance Orbiter, Europa Clipper; Китай – Tianwen-2).

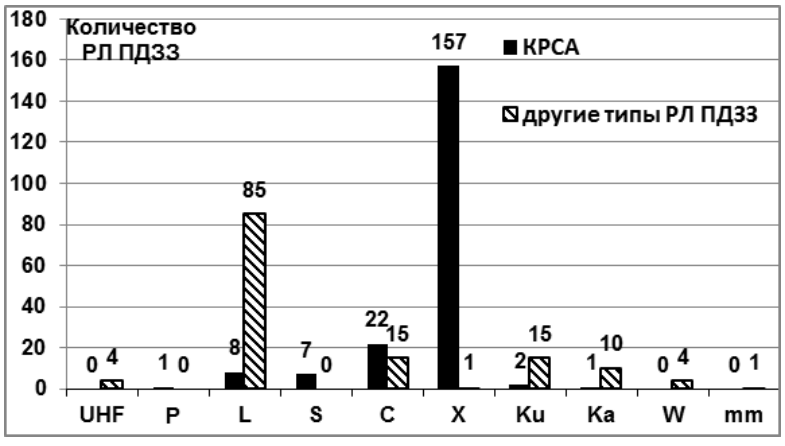


Рис. 2. Текущее распределение РЛ ПДЗЗ по частотным диапазонам, выделенным ITU-R для СКИ и ССИЗ (двух- и трехчастотные РЛ ПДЗЗ учтены в соответствующих диапазонах)

2. COM 6/13 – после завершения исследования потребностей в спектре на WRC-2031 провести распределение в диапазоне 275–325 ГГц в интересах ССИЗ, СКИ и других радиослужб.

3. COM 6/21 – на WRC-2031 в интересах ССИЗ принять решение о расширении S-диапазона до 3–3,4 ГГц на вторичной основе.

4. COM 6/22 – на WRC-2031 обсудить результаты исследования совместной работы средств ССИЗ и службы радиоопределения в диапазоне 9,2–10,4 ГГц с принятием возможных мер.

В соответствии с рекомендациями ITU-R (RS.577-7, RS.1166-4, RS.1260-2, RS.1261-0, RS.2042-1, RS.2455-0) и резолюциями конференций (COM 6/8 WRC-2015, COM 6/4 WRC-2019) в среднесрочной перспективе рассматриваются варианты расширения P-диапазона (в пределах 0,46–0,47 или 0,42–0,47 ГГц) и введения нового VHF-диапазона (0,12–0,15 ГГц).

КЛАССИФИКАЦИЯ РЛ ПДЗЗ И ОБЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИХ РАЗРАБОТКЕ

Таксономическим признаком РЛ ПДЗЗ может служить тип геометрической модели обзора ПЗ – сочетания числа обрабатываемых ПЭМП и способа обзора (размерности профилирования). Под профилированием понимается способ сканирования ПЗ, при котором производится измерение ПЭМП вдоль избранного углового направления [ориентации диаграммы направленности антенны (ДНА)]. Дополнительно ПДЗЗ могут подразделяться по методу проведения измерений (активному, пассивному, комбинированному), способу измерений (прямому, косвенному) и типу поляризации на излучение и на прием (табл. 2, 3) [1, 5, 6].

Таблица 2

Характеристики частотных диапазонов РЛ ПДЗЗ

Выделенные диапазоны, ГГц	Ширина, МГц	Средняя длина волны	Статус диапазона	Другие радиослужбы ITU-R, функционирующие в диапазоне
VHF: 0,04–0,05	10	6,7 м	Вторичный	Фиксированная и мобильная связь
P/UHF: 0,432–0,438	6	70 см	Вторичный	Радиолокация, любительская связь, фиксированная и мобильная связь, служба космической эксплуатации (Земля–космос), авиационная радионавигация
L: 1,215–1.3	75	24,5 см	Первичный	Радиолокация, спутниковая радионавигация, любительская связь
S: 3,1–3,3	200	9,4 см	Вторичный	Радиолокация
C: 5,25–5,57	320	5,6 см	Первичный	Радиолокация, авиационная радионавигация
X: 8,55–8,65 9,2–10,4	100 1200	3,5 см 3,1 см	Первичный Первичный	Радиолокация, радионавигация, фиксированная связь
Ku: 13,25–13,75 17,2–17,3	500 100	2,2 см 1,7 см	Первичный Первичный	Авиационная радионавигация, радиолокация
K: 24,05–24,25	200	1,3 см	Вторичный	Радиолокация, любительская связь
Ka: 35,5–36	500	8,3 мм	Первичный	Радиолокация (стационарная, мобильная)
W: 78–79 94–94,1	1000 100	3,8 мм 3,2 мм	Первичный Первичный	Радиолокация, любительская спутниковая связь, космические исследования (космос–Земля)
mm: 130–134 237,9–238	4000 100	2,2 мм 1,3 мм	Первичный Первичный	Радиолокация

Таблица 3

Общая классификация РЛ ПДЗЗ

Размерность профилирования	Способ обзора	Регистрируемые/косвенно используемые ПЭМП								Типовые РЛ ПДЗЗ
		Временные				Пространственные				
		Амплитуда	Время	Частота	Фаза	Отношение	Угол	Угол крена	Угол курса	
Одномерное (вдоль фиксированного углового положения ДНА)	Последовательный	+/	+/					/+	/+	РЛВ (направление – в надир)
Двумерное (вдоль фиксированного углового положения ДНА на избранном интервале дальности)	Последовательный построчный	+/	+/		/+			/+	/+	Интерферометрический РЛВ
	Последовательный построчный	+/	+/			+/	+/	/+	/+	РЛСк: – с раздельными антеннами (для каждого из наклонных направлений); – с вращающимися одной-двумя ДНА (по образующей конуса); РЛС БО (перпендикулярно трассе)
	Последовательно-параллельный	+/	+/	+/		+/	+/	/+	/+	РСА (практически перпендикулярно трассе)
		+/	+/	+/	+/	+/	+/	/+	/+	Интерферометрический РСА
Трехмерное (вдоль изменяемого положения или совокупности фиксированных ДНА на избранном интервале дальности)	Параллельный	+/	+/			+/	+/	/+	/+	РЛП: – РЛС наблюдения тропосферы; – РЛС подповерхностного ДЗЗ; – РЛС наблюдения ионосферы; – РЛС обзора пространства

Примечание: +/ – измеряемый ПЭМП; /+ – привлекаемый ПЭМП для обеспечения измерений.

РЛВ, относящиеся к РЛ ПДЗЗ с одномерным профилированием, осуществляют последовательный обзор УПЗ при ориентации ДНА в надир и высокоточном измерении временных задержек, мощности и формы отраженных импульсов для определения высоты КА и характеристик УПЗ. Для компенсации влияния ионосферы (искажения величины временной задержки широкополосных РЛ сигналов и рефракции) и одновременной чувствительности к гравитационным и капиллярным составляющим морского волнения РЛВ имеют две рабочие частоты, как правило, Ku-/C-диапазонов [КА ЕС Sentinel-3/-6, Китая Haiyang-2 (совмещены с РЛСк), США Jason-3 и РФ]. Некоторые РЛВ выполняются в одном Ka-диапазоне (КА Индии SARAL). РЛВ оборудуются зеркальной параболической антенной (ЗПА) Ø1–2 м, при этом для двух частот образуются две ДНА с разной шириной (различной шириной пятна на ПЗ до 8–30 км). Ряд РЛВ оборудуются СВЧ-радиометром для дальнейшей коррекции тропосферной задержки. РЛВ реализуют, как правило, два режима при линейных или круговых поляризациях сигнала: некогерентный LRM с разрешением в плане до 0,8 км и с доплеровской обработкой SARM с разрешением по азимуту (вдоль траектории полета) до 0,3 км. Для достоверной интерпретации высокоточных измерений высоты (до 2–4 см) на борту КА устанавливают многоканальные высокоточные навигационные системы, лазерные уголковые отражатели и систему траекторных измерений DORIS, принимающую сигналы от обширной сети наземных станций, оператором которой выступает компания Франции Thales Alenia Space.

К РЛ ПДЗЗ с двумерным профилированием, определяющим удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) площадных ОПЗ с временной, частотной, поляризационной и угловой зависимостями, относятся:

– интерферометрические РЛВ;

– РЛСк с раздельными АС для каждого из фиксированных азимутальных направлений или ЗПА с коническим сканированием;

– РЛС БО и КРСА различных типов.

Указанные РЛ ПДЗЗ строят пространственное распределение интенсивности отраженного сигнала [радиолокационное изображение (РЛИ) УПЗ] для одного или нескольких угловых ракурсов.

Интерферометрические РЛВ (ИРЛВ) имеют две АС, разнесенные на некоторую базу [КА ЕС Cryosat-2 Ku-диапазона с ЗПА (с перспективной заменой на КА Sentinel-9/CRISTAL с ИРЛВ Ku-/Ka-диапазонов), КА США/Франции SWOT Ku-/Ka-диапазонов с рефлекторными АС], и сочетают измерение высоты (режимы LRM и SARM) в полосе с шириной больше размеров пятна ДНА (до сотни километров) и построение РЛИ (режим SARIn). КА SWOT с ИРЛВ KaRIn Ka-диапазона ведет РЛН в двух полосах шириной по 50 км (в каждой из них выполняется прием сигнала только на одной линейной поляризации) справа и слева от трассы с разрывом до 20 км, а в надире – РЛВ Ku-/C-диапазонов. С 2019 г. в Китае разрабатывается КС ДЗЗ Guanlan на основе КА с ИРЛВ Ku-/Ka-диапазонов, совмещенного с лидаром (1064, 532 и 486 нм) для более полного решения океанографических задач, путем одновременного поверхностного и подповерхностного ДЗЗ глубиной до 300 м с вертикальным разрешением до 1 м. Формирование в ИРЛВ до пяти парциальных ДНА в каждом диапазоне позволяет реализовать непрерывную полосу РЛН шириной до 160–180 км с пространственным разрешением до 0,5 км с точностью определения высоты до 0,5–2,5 см, что является значительным усовершенствованием возможностей совместного ДЗЗ КА SWOT и КА США/Франции CALIPSO с лидаром инфракрасного (ИК) диапазона. Запуски КА в 2023–2024 гг., декларированных как КРСА (Luojia 2-01 Ka-диапазона и Jigang-1/AirSat-01 Ku-диапазона с «нетрадиционной» для КРСА АС в форме многосекционного параболического цилиндра с облучателем в форме волноводно-щелевой АР), а также экспериментального ИРЛВ InIRA Ku-диапазона ВВ-поляризации на орбитальной станции Tiangong-2, следует считать, по всей видимости, этапами практической отработки технологий создания КС ДЗЗ Guanlan.

Пространственные изменения характеристик волнения моря приводят к анизотропному рассеянию ЭМП, т. е. УЭПР, зависящей от направления РЛН. Поэтому в **РЛСк**, реализующем последовательно-построчный обзор, используются три АС С-диапазона для определения направления и скорости приводного ветра в диапазоне 2–24 м/с с разрешением 2 м/с на УПЗ размером 12–50 км в полосе 500 км (КА ЕС MetOp (в перспективе MetOp-SG-B), Китая Haiyang-4). Тенденции к уменьшению массово-габаритных характеристик КА привели к применению одной вращающейся ЗПА Ku-диапазона с реализацией двойного конического сканирования в полосе 1400–1800 км (КА Китая Haiyang-2, Индии SCATSat-1) с аналогичными достигаемыми характеристиками ДДЗЗ. При этом снижение с трех до двух азимутальных направлений РЛН потребовало привлечения измерений на ортогональных поляризациях и при двух углах падения. Как правило, во внешнем конусе (угол крена ДНА 49–51°) используется ВВ-поляризация, а во внутреннем (угол крена ДНА 42–44°) – ГГ-поляризация. В КА Китая CFOSAT реализованы два РЛСк Ku-диапазона: SWIM на базе ЗПА с шестью ДНА с вращением облучателей, обеспечивающей углы падения в надирной области 0–10°, и SCAT на базе двух вращающихся антенных решеток (АР) с РЛН в полосе шириной свыше 1000 км.

Значительное развитие получили **пассивные РЛСк** L-диапазона с реализацией методов рефлектометрии и многопозиционного РЛН на основе регистрации параметров отраженных сигналов от морской поверхности, излучаемых передатчиками КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Орбитальное построение существующих ГНСС позволяет получить до четырех-шести угловых ракурсов РЛН морской поверхности и соответственно (как и в РЛСк) восстановить УЭПР и характеристики волнения. В отличие от ряда стран, применяющих единичные КА с пассивными РЛСк GNSS-R [Канада (Killick 1), Испания (^{3}Cat-4), Индия (EOS-08), ЕС (PRETTY), Великобритания (DoT-1)], США и Китай формируют многоспутниковые ОГ КА этого класса [США CYGNSS, Cicero, MuSat; Китай Fengyun-3, Bufeng-1, Tianmu-1 и Yunyao-1 (до 60–90 КА)]. Одним из актуальных направлений применения GNSS-R с гибридными поляризациями (включая круговые, используемые в ГНСС, и линейные ортогональные) является определение УЭПР участков суши с пространственным разрешением до 0,5–3,5 км, апробированного на КА США SMAP с **РЛС БО** и СВЧ-радиометром L-диапазона с коническим сканированием на базе вращающейся ЗПА. РЛС БО не получили широкого распространения из-за возможности реализации некогерентного РРЛН в КРСА и грубого реализуемого пространственного разрешения, хотя и в более широкой полосе РЛН до 750 км по сравнению с КРСА.

РЛП различаются по преимущественной области РЛН пространства и соответственно выбранному частотному диапазону. Ориентация ДНА в нижнюю полусферу (в область надира) характерна для **РЛП подповерхностного зондирования** (VHF-, UHF- и P-диапазоны), РЛП исследования тропосферы (Ku-, Ka-, W- и мм-диапазоны) и РЛП исследования ионосферы (HF- и VHF-диапазоны). К первой группе РЛП можно отнести КА США Gossamer-1/-2, на которых ведется отработка технологий развертывания АС VHF-диапазона в форме кросс-диполей, и перспективные КА, на которых, вероятно, будут установлены АС директорного типа (Уда-Яги и др.) с реализацией 2-3 диапазонов – КА США OASIS и DOWSER/DEBRIS, КА ЕС STRATUS и КА Китая CubeSat Train. Состав ОГ КА с перспективными РЛП этого типа предусматривает многопозиционное РЛН с повышением показателей разрешения ДДЗЗ.

РЛП исследования тропосферы измеряют мощность сигнала объемного отражения в диапазоне временных задержек, соответствующего высоте тропосферы (0–30 км), для определения содержания гидрометеоров: на КА США CloudSat и КА ЕС/Японии EarthCARE используется РЛП W-диапазона; на КА США/Японии GPM – РЛП Ku-/Ka-диапазонов (использование двух частот в каждом диапазоне связано с резонансным рассеянием на типовых размерах гидрометеоров различных типов). В случае сканирования несколькими ДНА в определенном угловом секторе (некоторой полосе) реализуется трехмерное профилирование толщи тропосферы, при этом отклонение ДНА от надира позволяет

дополнительно реализовать измерение скорости ветра, что, вероятно, апробируется на КА США RainCube и Veery v0.3/Ectobius с РЛП Ка-диапазона. Аналогичные задачи возлагаются на перспективную ОГ США AOS (*Atmosphere Observing System*) с доплеровскими РЛП Ku-диапазона на КА AOS-Storm, AOS-Sky и PMM. На перспективном КА ЕС WIVERN предусматривается размещение двухполяризационного доплеровского РЛП W-диапазона с конически сканирующей ДНА с измерением скоростей ветра и профилей объемной ЭПР с вертикальным разрешением 640 м в полосе обзора 800 км. В ОГ КА Tomorrow, финансируемой исследовательской лабораторией AFRL ВВС США, предусматривается развертывание 12 КА с РЛП Ка-диапазона Tomorrow-R и 18 КА Tomorrow-S с СВЧ-радиометрами. В перспективной ОГ США из четырех КА INCUS/SmallSat предусматривается использование РЛП Ка-диапазона с пятью ДНА, обеспечивающими пространственное разрешение по горизонтали 3 км и по вертикали 240 м.

В **РЛП исследования ионосферы** допустимо использование HF-диапазона вследствие экранирующего характера исследуемой среды. Также к средствам исследования ионосферы и тропосферы следует отнести ПДЗЗ, реализующие радиозатменный метод GNSS-RO по сигналам КА ГНСС у границы нижней полусферы и установленные на КА США Lemur (ОГ до 160 КА) и на большинстве вышеуказанных КА с РЛСк GNSS-R. КА Австралии Buccaneer ведет прием сигналов от загоризонтных РЛС JORN и, вероятно, РЛС исследования ионосферы SuperDARN.

К **РЛП обзора верхней и нижней полусфер** можно отнести бортовые РЛС мониторинга фрагментов космического мусора, не наблюдаемого с ПЗ (как правило, размером менее 5–10 см): на КА Австрии ADLER и США Jackal W-диапазона; на КА Великобритании ORB-12 Strider, Японии DRUMS и США Droid Ка-диапазона. Очевидно, что подобные РРЛН околоземного пространства могут быть реализованы и в РЛП исследования тропосферы, благодаря компактному размещению солнечных батарей (СБ) и АС на малых КА (МКА) весом <500 кг.

АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ТЕНДЕНЦИЙ В РАЗРАБОТКЕ И ПРИМЕНЕНИИ КРСА

КРСА являются самым многочисленным классом РЛ ПДЗЗ, что отражает их приоритетную роль в КС ДЗЗ различного назначения 17 стран и сообществ, имеющих практические планы наращивания своих ОГ с освоением новых частотных диапазонов (рис. 3).

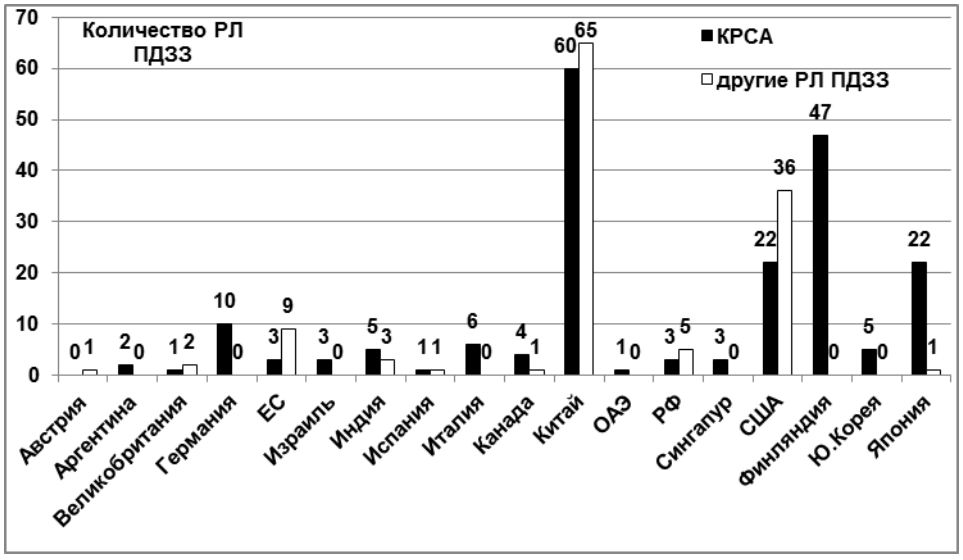


Рис. 3. Текущее распределение РЛ ПДЗЗ по государствам

Практические разработки КРСА, в том числе совместно с вышеуказанными странами, ведут Бразилия, Вьетнам, Дания, Индонезия, Иран, Малайзия, Норвегия, Португалия, Турция и ЮАР. Подавляющее большинство КРСА (~80%) реализовано в X-диапазоне, благодаря максимальной ширине спектра, выделенного ITU-R, а также возможности реализовать АС малого размера с размещением на МКА (МКРСА) с последующим формированием многоспутниковой ОГ. В ряде источников [4, 18, 21] был сделан оптимистичный прогноз об увеличении ОГ КРСА к 2025 г. до 400–500 КА, однако практика показала, что их проектирование и эксплуатация связаны с высокими экономическими затратами и рисками (табл. 4).

Таблица 4

Характеристика многоспутниковых ОГ КРСА

Наименование КРСА, компания-разработчик, страна	Частотный диапазон	Тип орбиты	На орбите/план ОГ (число запусков)	Примечания
Действующие проекты				
AIRSAT/ Zhongke/ Haishao, Китай	Ku, X (на разных КА)	ССО, НО	3/21 (3 с 2024 г.)	Совместная ОГ с 24+ ОЭ КА
Siwei Gaojing-2 /SuperView Neo 2, Китай	X	ССО	4/8-16 (4 с 2021 г.)	Совместная ОГ с 20 (40)+ ОЭ КА, интерферометрия
Zhixing-2/SmartSat-2, Китай	X	ССО, НО	1/12 (1 с 2024 г.)	Совместная ОГ с ОЭ КА
Haiwangxing/ Neptune, Китай	X	ССО	1/12-36 (1 с 2024 г.)	–
Haisi/ Tianxian/ MiniSAR/ Spacety, Китай	X, C (на разных КА)	ССО, НО	1/96 (2 с 2020 г.)	–
Jilin SAR, Китай	X	ССО	1/ 12+ (1 с 2024 г.)	Совместная ОГ с 60+ ОЭ КА
Chaohu-1/Spacety, Китай	C	ССО	1/ (1 с 2022 г.)	–
PIESAT/Hongtu/ Zhongyuan/ Nuwa Constellation, Китай	X	ССО	12/38 (12 с 2023 г.)	4 группы по 4 КА (преимущественно интерферометрические РРЛН)
Luojia 2/ Orient Eye, Китай	Ka	ССО, НО	1/- (1 с 2023 г.)	Совместная ОГ с 60+ ОЭ КА
Capella/Capella Space, США	X	ССО, НО	6/36 (13 с 2018 г.)	–
Umbra/Umbra-SAR/ Umbra Lab, США	X	ССО	8/24 (9 с 2021 г.)	–
ICEYE-X/ ICEYE, Финляндия	X	ССО	47/- (49 с 2018 г.)	Часть КА из ОГ передана в оперативное использование другим странам (США –3–10, Украине – 1, Бразилии – 2, ОАЭ – 2)
425 Project SAR, Ю.Корея	X	ССО, НО	2/4 (2 с 2024 г.)	Совместная ОГ с 6 ОЭ КА
S-STEP, Ю.Корея	X	ССО	1/32 (1 с 2023 г.)	–
QPS-SAR/ iQPS, Япония	X	ССО, НО	6/36 (8 с 2019 г.)	–
StriX/ Synspective, Япония	X	ССО, НО	5/30 (6 с 2021 г.)	–

Окончание табл. 4

Наименование КРСА, компания-разработчик, страна	Частотный диапазон	Тип орбиты	На орбите/план ОГ (число запусков)	Примечания
Нереализованные и приостановленные проекты				
XR/ R2 Space, США	X	ССО	0/8-10	Компания использует до 3-10 МКРСА Iceye
Ursa/Ursa Space Systems, США	X	ССО	0/4	Компания переориентирована на обработку РЛД
XpressSAR, США	X	ССО, НО	0/8	Компания планировала заказ по 4 КА у IAI Израиля и EADS Германии с запуском с 2022 г.
PredaSAR/ Terran Orbital, США	X, C (на разных КА)	ССО, НО	0/48-96	Компания переориентирована на другие проекты с 2022 г. после ее приобретения концерном Lockheed Martin
EOS SAR/ EOS Data Analytics, США	S, X (совмещенная АС)	ССО, НО	0/12	Совместная ОГ с ОЭ КА (проект аналогичен OptiSAR). Запуски планировались с 2021 г.
Microsat/ Trident Space, США	X	ССО, НО	0/48	Запуски планировались с 2021 г.
SWIFT/ Planet Labs, США	X	ССО, НО	0/6	Совместная ОГ с ОЭ КА (200+ Dove/Flock, 20+ SkySat), лицензия получена в 2018 г.
OptiSAR/ UrtheCast, Канада	X, L (совмещенная АС)	ССО, НО	0/8	Компания обанкротилась в 2020 г. Разработки выкупила компания Alpha Insights с планом запуска до 18 КРСА Alpha SAR-XL
StarSAR-X/MetaSensing, Италия	X	ССО	0/2	Переориентирована на ОГ КА ЕС IRIDE совместно с компаниями D-Orbit и Thales Alena Space
Stella Marina, Италия	X	ССО	0/20	
Объявленные новые проекты				
IRIDE/EC	X	ССО	0/12	Совместная ОГ с 22+ ОЭ КА (с 2026 г.)
36 Tiangang, Китай	X	ССО	0/36	Совместная ОГ с ОЭ КА (с 2025 г.)
DSPL/ Project Oberon, Великобритания	X	ССО	0/6	Развертывание с 2025 г.
MicroSAR/KSAT, Норвегия	C	ССО	0/10	Совместно с компанией США Tyvak
DSAR/Yahsat, ОАЭ	X	ССО	0/7	На базе КРСА Финляндии ICEYE-X
INFANTE/Tekever, Португалия	C	ССО	0/12	

Анализ баллистического построения ОГ показывает, что все КРСА (за исключением КРСА Китая L-диапазона Ludi Tance 4-01/ L-SAR 04A, расположенного на геосинхронной орбите с наклонением 16°) располагаются на низких круговых орбитах с высотой 350–1100 км, обусловленной, прежде всего, критической зависимостью уровня принимаемого сигнала от величины наклонной дальности и, следовательно, ограничениями энергетического ресурса. Более низкие орбиты требуют увеличения диапазона сканирования ДНА по углу крена для покрытия ширины полосы обзора в 400–500 км. Масса КА с КРСА увеличивается с ростом высоты орбиты (что удорожает запуск) из-за большего веса и размера СБ, аккумуляторных батарей и АС по сравнению с оптико-электронными (ОЭ) КА ДЗЗ. Преобладающая часть ОГ КРСА расположена на солнечно-синхронных орбитах (ССО), обеспечивающих

глобальность РЛН ПЗ. Кроме того, ССО при выборе соответствующей долготы восходящего узла орбиты позволяют совместить трассу с терминатором (границей освещенной и неосвещенной части ПЗ) и обеспечить практически непрерывное освещение СБ КРСА и выгодный энергетический режим. Для КРСА дм-диапазона выбор подобной орбиты позволяет «уклониться» от максимума электронной концентрации ионосферы в дневное время и тем самым снизить поляризационные эффекты, искажающие сигналы.

Часть ОГ КРСА располагается на наклонных орбитах (НО) вследствие нескольких обстоятельств. Во-первых, для ССО и НО вследствие схождения и изомаршрутности трасс максимальная частота пролетов (и, следовательно, высокая периодичность РЛН) достигается в районе вертекса [в точке смены направления ветви витка (восходящая/нисходящая) при равенстве широты подспутниковой точки КРСА и наклонения орбиты], т. е. выбором наклонения НО можно регулировать частоту РЛН для требуемого широтного пояса. Во-вторых, КРСА на НО обеспечивают более широкий диапазон углов азимута РЛН. Из-за бокового обзора КРСА для ССО образуются два азимутальных сектора РЛН: с востока и с запада. Для НО при широте УПЗ, меньшем наклонения орбиты, образуется четыре азимутальных сектора РЛН. В-третьих, обратные НО с наклонением более 90° (ССО также являются обратными) позволяют получить приращение относительной скорости перемещения КРСА и наблюдаемого УПЗ за счет тангенциальной составляющей линейной скорости вращения ПЗ. Это означает возможность получения б*о*льшей ширины доплеровского спектра при заданной ширине ДНА по азимуту или возможность сужения ДНА при заданном уровне разрешения (повышения отношения сигнал/шум без увеличения мощности излучения, т. е. экономии энергетического ресурса).

КРСА, как правило, оборудуются одной крупногабаритной антенной – активной фазированной антенной решеткой (АФАР) или ЗПА. ЗПА круговой или эллиптической формы с диаметром до 2–3 м выполняются со сплошным раскрывом, а с б*о*льшим – с сеточным. В связи с ограничениями на габаритные размеры головных обтекателей ракет-носителей АФАР и ЗПА, как правило, выполняются с многократным развертыванием/раскрытием. Для существенного снижения удельного веса АФАР в ряде перспективных проектов рассматриваются гибкие (мембранные) многослойные структуры, совмещающие излучающую поверхность с приемопередающими модулями печатного монтажа, при этом дополнительное снижение веса достигается использованием в качестве несущей рамы АФАР трубчатых конструкций, образуемых при развертывании и вытягивании металлизированных лент. Для снижения веса КРСА с АФАР иногда СБ располагают на ее обратной стороне (КРСА X-диапазона Японии StriX и Ю.Кореи S-STEP). Из-за трудностей обеспечения развертывания и сохранения профиля отражателя в ЗПА, получают распространение рефлекторные антенны (КРСА Сингапура NeuSAR и перспективные КРСА Норвегии MicroSAR) – плоские мембранные структуры с нанесенным микрополосковым рисунком, обеспечивающим фокусирование излучения как в ЗПА.

Существенное развитие получают КРСА с реализацией интерферометрических РРЛН при групповом (кластерном) полете КА. Вслед за КРСА TerraSAR-X/TanDEM-X подобные проекты в X-диапазоне реализуют Германия [два пассивных КРСА SARah-2/-3 с КРСА SARah-1 и перспективными КРСА TerraSAR-X NG и, возможно, КРСА Испании PAZ и Ю.Кореи Kompsat-6 (все КРСА разработаны на базе КА TerraSAR-X)], Китай (две пары КРСА Tianhui-2, три группы по четыре КРСА PIESAT), США (две пары КРСА Umbra) и, вероятно, Финляндия. В Германии планируется реализация аналогичных проектов в X-диапазоне (до четырех КРСА HRWS/HybridSAR) и L-диапазоне (два КРСА TanDEM-L). В ЕС планируется разработка двух КРСА Harmony C-диапазона (прежнее название STEREOID) в качестве интерферометрического дополнения к ОГ КРСА Sentinel-1C/-1D. Также следует отметить экспериментальный КРСА США SNoOPI, функционирующий на основе отраженных сигналов КА связи США MUOS, находящихся на ГСО [частотный диапазон, выделенный для службы фиксированной связи (0,240–0,380 ГГц), больше, чем в P-диапазоне].

К основным тенденциям в разработке и применении КРСА относятся:

а) создание бортовых многополяризационных и многочастотных АФАР и ЗПА на основе радиационно и термически стойкой элементной базы;

б) разработка высокоскоростных линий передачи данных с борта КРСА и КА-ретрансляторов как радио-, так и оптического диапазонов;

в) разработка элементов бортовых систем энергоснабжения КА (устойчивых и высокоэффективных СБ, емких и легких АКБ);

г) создание бортовых («внутренних») средств контроля амплитудно-фазовой стабильности приемопередающего тракта и калибровочно-юстировочных средств («внешней») радиометрической и геометрической калибровки РЛ ДДЗЗ;

д) разработка методов управления многоспутниковой ОГ и методов дешифрирования РЛИ на основе технологий искусственного интеллекта;

е) устранение воздействия непреднамеренных помех от наземных РЛС и от КРСА, ведущих РЛН одного УПЗ;

ж) обработка РЛ ДДЗЗ на борту КРСА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличивающийся круг государств, разрабатывающих и эксплуатирующих РЛ ПДЗЗ, несмотря на их высокую стоимость, и появление новых режимов РЛН и способов обработки РЛ ДДЗЗ свидетельствуют о приоритетности данных средств в КС ДЗЗ. Активный характер РЛН ПЗ определяет размещение РЛ ПДЗЗ на низких орбитах и, как следствие, приводит к необходимости развертывания многоспутниковой ОГ для реализации высокой периодичности обзора. Поэтому после первичной апробации РЛ ПДЗЗ на МКА целесообразен переход к серийным КА на базе унифицированных космических платформ.

Список использованных источников

1. *Полетаев А. М.* Информологический анализ космических радиолокационных систем. – СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2013. – 214 с.

2. *Полетаев А. М., Жегалов А. Н.* К определению понятия информативности // Информация и космос. – 2010. – № 1. – С. 66–74.

3. *Полетаев А. М., Лазутин Р. Ю.* Анализ принципов построения и режимов функционирования космических систем радиолокационного наблюдения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 159–169.

4. *Полетаев А. М.* Радиолокация Земли из космоса: состояние и перспективы // Труды XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» / под общ. ред. И. В. Сахно. – СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2017. – Т. 4. – С. 144–165.

5. Радиолокационные методы исследования Земли / под ред. Ю. А. Мельника. – М. : Сов. радио, 1980. – 264 с.

6. A Strategy for Active Remote Sensing Amid Increased Demand for Radio Spectrum. – National Academies Press, Washington, DC, 2015. – 247 p.

7. Национальное космическое агентство Китая : [офиц. сайт]. – URL : http://www.cnsa.gov.cn (дата обращения: 15.03.2025).

8. Европейское космическое агентство : [офиц. сайт]. – URL : http://www.esa.org (дата обращения: 15.03.2025).

9. Международный союз по электросвязи : [офиц. сайт]. – URL : http://www.itu-r.int (дата обращения: 15.03.2025).

10. Национальное космическое агентство Японии : [офиц. сайт]. – URL : http://www.jaxa.org (дата обращения: 15.03.2025).

11. Национальное космическое агентство США : [офиц. сайт]. – URL : http://www.nasa.org (дата обращения: 15.03.2025).

12. База баллистических данных КА // Общество ученых США : [офиц. сайт]. – URL : http://www.ucsusa.org/satellite_database (дата обращения: 15.03.2025).

13. База баллистических данных КА // Организация НОРАД : [офиц. сайт]. – URL : https://celestrak.org/NORAD/elements (дата обращения: 15.03.2025).

14. База данных КА ДЗЗ Европейского космического агентства : [офиц. сайт]. – URL : https://directory.eoportal.org (дата обращения: 15.03.2025).

15. Форум космонавтики. – URL : https://forum.nasaspaceflight.com (дата обращения: 15.03.2025).

16. Форум по ДЗЗ. – URL : https://satelliteobservation.net (дата обращения: 15.03.2025).

17. Космические новости [официальный сайт]. – URL : https://spacenews.com (дата обращения: 15.03.2025).

18. Форум по КРСА. – URL : https://syntheticaperturеradar.com/sar-satellite-missions (дата обращения: 15.03.2025).

19. База баллистических данных КА. – URL : https://www.n2yo.com (дата обращения: 15.03.2025).

20. База данных о малых КА ДЗЗ. – URL : https://www.newspace.im (дата обращения: 15.03.2025).

21. Отчет о перспективах развития КА ДЗЗ. – URL : https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/synthetic-aperture-radar-sar-in-space-sector-market (дата обращения: 15.03.2025).

22. База данных о малых КА ДЗЗ. – URL : https://www.nanosats.eu (дата обращения: 15.03.2025).

М. Ю. Прокофьев;
А. А. Чувиров,
кандидат технических наук

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ УЗЛОВ КОММУТАЦИИ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Обоснована ключевая роль функциональной надежности как критической составляющей общей надежности систем связи. Предложен иерархический методический подход к оперативному оцениванию и управлению функциональной надежностью узлов коммутации на основе расчета единичных и комплексных показателей. Представлена схема зависимостей единичных и комплексных показателей функциональной надежности. Разработанный подход к их расчету обеспечивает переход от управления надежностью по факту ее снижения к превентивному, планируя мероприятия технического обслуживания на основе прогноза состояния функциональной надежности системы. Определено ключевое направление для повышения эффективности управления функциональной надежностью, реализуемые посредством применения предложенных показателей: оптимизация критериев функционального отказа на основе динамики показателей функциональной надежности и алгоритмов диагностики с использованием модели состояний. Приведен расчетный пример для демонстрации практической применимости разработанного методического подхода к оцениванию и управлению функциональной надежностью узлов коммутации сетей связи.

Ключевые слова: методический подход, функциональная надежность, оценивание надежности, узлы коммутации, сети связи, управление надежностью.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности является важным аспектом всех этапов жизненного цикла сложных технических систем, таких как узлы коммутации сетей связи (УКСС). Однако надежность этих систем не сводится к безотказной работе аппаратных средств. Успех в реализации функций системы в значительной степени зависит и от внешних факторов, включая взаимодействие с оператором, окружающей средой и другими техническими системами. Следует подчеркнуть, что к надежности узлов коммутации, являющихся важными элементами наземной инфраструктуры сетей связи и обеспечивающих связь отдельных сегментов сети, предъявляются исключительно высокие требования, поскольку их отказ может повлечь нарушение функционирования системы связи в целом.

Для комплексного учета этих факторов теория надежности различает структурную и функциональную составляющие. Если структурная надежность, связанная с работоспособностью аппаратуры [1], традиционно находится в центре исследований, то функциональной надежности (ФН), отражающей корректность выполнения функций системы [2], зачастую, уделяется значительно меньше внимания. Вместе с тем именно выполнение системой своих функций является основной целью ее создания и эксплуатации.

В результате формируется проблемная ситуация, при которой используемые методы обеспечения надежности ориентированы преимущественно на управление структурной надежностью аппаратуры, но не позволяют в необходимом объеме прогнозировать и предотвращать функциональные отказы (ФО) – события невыполнения функциональной задачи вследствие нарушения информационного процесса [2], обусловленные воздействием внешних факторов, сбоями в программном обеспечении или деградацией качества обслуживания. Для УКСС данная проблема имеет особую значимость, поскольку возникновение ФО может повлечь нарушение качества выполнения функции обмена данными даже при полностью работоспособной аппаратной составляющей системы.

Анализ существующих подходов к обеспечению надежности сложных технических систем позволяет выделить несколько ключевых направлений.

Первое направление связано с совершенствованием методов технического диагностирования [3–9], направленных на повышение точности локализации отказов в условиях неопределенности и многомерных данных. Однако данные методы в основном ориентированы на отказы аппаратных компонентов и требуют дополнительной адаптации для диагностики ФО. Более того, для УКСС, характеризующихся ограниченным и структурированным набором контролируемых параметров, применение ресурсоемких методов, основанных на алгоритмах машинного обучения, может оказаться избыточным.

Второе ключевое направление – разработка комплексных вероятностных моделей для оценивания надежности [10–12]. Применительно к УКСС в данных моделях часто недостаточно учтено влияние внешних факторов, таких как помеховая обстановка или параметры трафика, что ограничивает их применение для прогнозирования ФО телекоммуникационного оборудования.

Таким образом, несмотря на значительное количество исследований в области надежности, наблюдается дефицит изысканий, комплексно учитывающих специфику ФН систем телекоммуникации. Особенности УКСС – обработка потоков заявок, зависимость от внешних воздействий на каналы связи, необходимость обеспечения непрерывного режима функционирования – требуют разработки специализированного методического подхода. Существующие модели часто не адаптированы для прогнозирования ФН на оперативных интервалах в условиях меняющейся нагрузки и учитывают больше структурные, а не функциональные аспекты отказа.

Целью настоящей работы является разработка и формализованное описание целостного методического подхода к оцениванию и проактивному управлению ФН УКСС. Новизна работы заключается в разработке полумарковской модели процесса передачи данных в УКСС, учитывающей состояния отказа штатной системы диагностирования, а также в вычислении показателей ФН на основе данных этой модели для прогнозирования ФО и превентивного принятия решений по реализации воздействий, управляющих состоянием ФН.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПОЛУМАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В УЗЛЕ КОММУТАЦИИ СЕТИ СВЯЗИ

Для оперативного управления ФН УКСС предлагается трехуровневая система оценивания ФН, где каждый последующий уровень агрегирует данные предыдущего для оценки ФН системы в целом и формирования прогноза. В интересах получения достоверной оценки вычисляются значения взаимосвязанных единичных и комплексных показателей ФН. Графически структура связей показателей ФН с указанием уровней иерархии подхода к оцениванию ФН представлена на схеме (рис. 1).

Для оценивания ФН необходимо определить требования, предъявляемые к ФН конкретного УКСС с учетом особенностей его функционирования. На основе этих принципов конкретизируется перечень необходимых показателей для прогнозирования функционального состояния системы и управления ее ФН.

В основе подхода лежит оценка надежности выполнения элементарных процессов. Ключевым для УКСС является процесс передачи пакета данных в узле коммутации. На безошибочность его выполнения напрямую влияют параметры узла, определяющие качество сервиса (*Quality of Service* – QoS). Основными контролируемыми параметрами являются джиттер задержки, вероятность потери пакета, задержка при передаче данных, уровень использования вычислительной мощности процессора, уровень использования буферной памяти и частота ошибок на интерфейсе. Вероятность безошибочного выполнения данного процесса будет зависеть от совместной вероятности соблюдения пороговых значений для каждого параметра. Их допустимые пороговые значения задаются требованиями QoS.

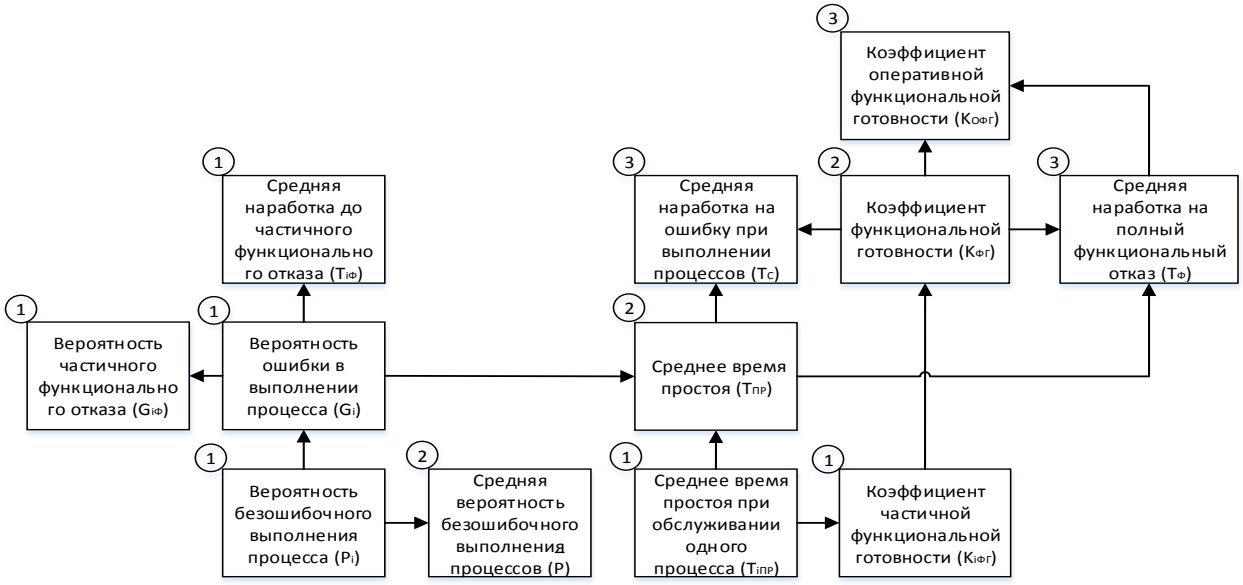


Рис. 1. Схема зависимостей между показателями ФН

Для реализации предлагаемого подхода к оцениванию ФН необходима разработка модели, описывающей процесс смены состояний, в которых может находиться система. В качестве инструментария для этого можно использовать модифицированный топологический полумарковский метод [2]. Основным достоинством метода является учет неэкспоненциальных законов распределения, что позволяет применять его для оценивания ФН более широкого перечня технических систем [1]. На основе полученных данных рассчитываются показатели ФН системы. Метод позволяет анализировать сложные восстанавливаемые системы с большим числом состояний на предмет надежности [2].

Для моделирования ФН отдельного процесса, например передачи данных, строится специализированная полумарковская цепь. Она описывает деградацию качества выполнения процесса. Интенсивности переходов между состояниями определяются на основе статистических данных:

– моделирующих деградацию и восстановление процесса;
– моделирующих реакцию системы диагностирования;
– интенсивностей сбоев и восстановлений системы диагностирования.

Время пребывания в состояниях S_1 (S_6) и S_2 (S_7) может иметь неэкспоненциальное распределение, что характерно для параметров сетевого трафика. Вероятности и времена переходов, включая восстановление, оцениваются на основе данных мониторинга параметров $x_1 ... x_6$. Данная модель (рис. 2) позволяет оценить надежность процесса с точки зрения соблюдения требований к качеству его реализации, а не просто факта выполнения или невыполнения данного процесса. Предложенная модель носит обобщенный характер и может быть адаптирована к функциональным особенностям конкретных УКСС путем уточнения параметров переходов и статистической калибровки модели.

В результате применения метода формируется комплексная вероятностно-временная модель функционирования системы. Она предоставляет не только стационарные вероятности нахождения в каждом состоянии, но и распределения времени пребывания в этих состояниях, а также интенсивности переходов между ними. Этот набор данных служит основой для определения как единичных, так и комплексных показателей ФН.

Подход к оцениванию ФН сложных технических систем, таких как УКСС, можно представить в виде иерархической системы, в которой высшие уровни иерархии от низшего отличаются масштабом оцениваемых элементов или протяженностью периода времени, в рамках которого они оцениваются.

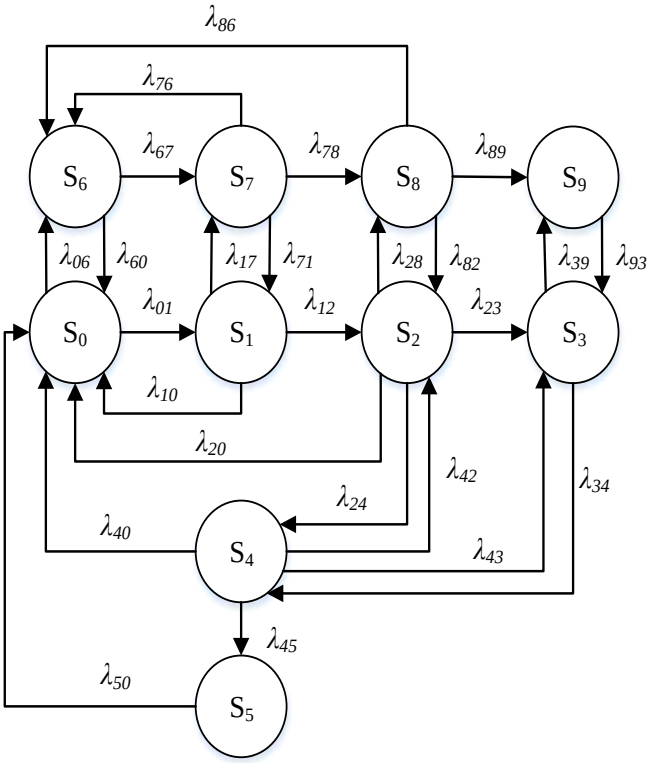


Рис. 2. Пример графа состояний процесса передачи данных для оценивания ФН модифицированным топологическим полумарковским методом

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

S_0 – передача данных в рамках требований к качеству выполнения процесса;

S_1 – кратковременное нарушение порога, не приводящее к сбою процесса;

S_2 – устойчивое нарушение порогов, сохраняющееся на протяжении нескольких итераций мониторинга;

S_3 – ФО;

S_4 – состояние углубленной диагностики;

S_5 – состояние аварийного восстановления работоспособности процесса;

S_6 – передача данных в рамках требований к качеству выполнения процесса при сбое в системе диагностирования;

S_7 – кратковременное нарушение порога при сбое в системе диагностирования;

S_8 – устойчивое нарушение порогов при сбое в системе диагностирования;

S_9 – ФО при сбое в системе диагностирования;

λ_{ij} – интенсивность перехода из состояния i в состояние j.

На первой ступени иерархии подхода к оцениванию ФН функционирование УКСС рассматривается на уровне отдельных процессов. На основе определенных посредством рассмотренного выше метода данных вычисляется вероятность однократного безошибочного выполнения каждого из выполняемых в текущий момент времени процессов в отдельности путем суммирования стационарных вероятностей нахождения процесса в состояниях

$$P_i = P(S_0) + P(S_6). \quad (1)$$

Опираясь на значения вероятности (1), вычисляется вероятность ошибки в выполнении этих процессов

$$G_i = 1 - P. \quad (2)$$

На основе сведений о времени пребывания процесса в различных состояниях, полученных посредством использования полумарковской цепи, рассчитывается среднее время простоя при обслуживании одного процесса:

$$T_{i\text{ПР}} = \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 + \tau_9, \tag{3}$$

где τ_i – время нахождения процесса в *i*-м состоянии.

Также на данной ступени определяется коэффициент частичной функциональной готовности [2]

$$K_{i\text{ФГ}} = \frac{1/\Omega_i}{1/\Omega_i + T_{i\text{ПР}}}, \tag{4}$$

где Ω_i – интенсивность потока заявок.

Показатель, представленный в выражении (4), является интегральным показателем доступности конкретной функции системы. Он необходим для оперативного обнаружения фактов учащения отказов при выполнении функции или увеличения времени восстановления после отказа. Опираясь на значения этого показателя могут приниматься решения о проведении мероприятий по повышению качества выполнения конкретных процессов. Низкое значение показателя может указывать на устойчивую деградацию выполняемой функции, что требует немедленного вмешательства. Возможными путями повышения данного показателя могут послужить, например, снижение интенсивности потока заявок или ускорения операций обнаружения ошибок и восстановления процесса.

На второй ступени подхода формируется оценка ФН уже в масштабе всей системы. Для этого вычисляется коэффициент функциональной готовности системы, отражающий вклад всех возможных комбинаций корректно выполняемых и невыполняемых процессов в обеспечение функциональной готовности путем вероятностного перебора состояний системы. Для его определения используется скорректированная формула [2]

$$K_{\text{ФГ}} = \sum_{R\subseteq\{1,\ldots,M\}} \left[\left(\prod_{i\in R} K_{i\text{ФГ}} \right) \left(\prod_{j\notin R} \left(1 - K_{i\text{ФГ}}\right) \right) \left(1 - \sum_{j\notin R} \omega_j \right) \right], \tag{5}$$

где ω_j – вес *j*-го процесса, определяемый экспертным методом;

M – конечное множество возможных процессов, выполняемых в системе;

R – множество корректно выполняемых процессов.

Это основной комплексный показатель состояния ФН УКСС. Он позволяет определить, какова вероятность того, что УКСС способен выполнять свои функции в целом. При снижении значения данного показателя ниже допустимого уровня необходимо планировать проведение мероприятий управления ФН, обеспечивающих возвращение ее показателей в границы допустимого диапазона значений. Весовые коэффициенты отражают относительную критичность процессов и характеризуют влияние их отказов на вероятность возникновения полного функционального отказа системы. Снижение данного комплексного показателя ниже допустимых значений требует немедленных управляющих воздействий. Эти воздействия должны быть направлены на повышение качества выполнения процессов в системе, коэффициент частичной функциональной готовности (4) которых был подвержен снижению. При этом необходимо учитывать приоритетность процессов, планируя мероприятия обслуживания.

Для перехода к третьей ступени оценивания необходимо определить значение среднего времени простоя системы [2]:

$$T_{\text{ПР}} = \frac{\sum_{i=1}^{M} G_i \cdot \Omega_i \cdot T_{i\text{ПР}}}{\sum_{i=1}^{M} G_i \cdot \Omega_i}. \tag{6}$$

Подход к оцениванию третьей ступени позволяет дать прогнозную оценку ФН системы на оперативном интервале времени. Данный интервал может соответствовать планируемому времени проведения сеанса связи, продолжительности одной смены дежурства и т. д. Но стоит заметить, что значение оперативного интервала обратно пропорционально точности получаемого прогноза. Для решения этой задачи подход предполагает расчет средней наработки на полный функциональный отказ [2]:

$$T_{\Phi} = \frac{T_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{ФГ}}}{\left(1 - K_{\text{ФГ}}\right) \sum_{i=1}^{M} \frac{g_{i\text{ФТ}}}{M}}, \tag{7}$$

где $g_{i\text{ФТ}}$ – вероятность трансформации i-й ошибки в частичный ФО, определяемая экспертно-статистическим способом.

Далее, с учетом результатов проведенных вычислений, коэффициент оперативной функциональной готовности системы определяется следующим образом [2]:

$$K_{\text{ОФГ}}(\tau_{\text{ОП}}) = K_{\text{ФГ}} \cdot e^{-\frac{\tau_{\text{ОП}}}{T_{\Phi}}}, \tag{8}$$

где $\tau_{\text{ОП}}$ – оперативный интервал времени.

Этот прогнозный показатель позволяет оценить вероятность работы УКСС без полных ФО в течение заданного времени. При этом экспоненциальная зависимость отражает вероятность безотказного функционирования системы на оперативном интервале времени. На основе полученных значений данного показателя возможно осуществление планирования проведения превентивных мероприятий по недопущению ФО системы и поддержанию ее функциональной готовности на требуемом уровне.

Снижение прогнозного коэффициента может указывать на то, что без принятия превентивных мер (например, снижения нагрузки, выделения дополнительных ресурсов, переключения на резервный канал передачи данных) выполнение системой своих функций будет осуществляться со сниженной ФН. Работа технических средств в таком режиме влечет высокий риск возникновения ФО и наступления сопутствующих ему негативных последствий. Это демонстрирует практическую полезность иерархического подхода для обоснования решений по управлению ФН.

Ключевым источником данных для вычисления показателей ФН являются системы мониторинга, использующие стандартные протоколы сетевого управления, например SNMP, которые позволяют в режиме, близком к реальному времени, опрашивать управляемые объекты и получать значения параметров, хранящиеся в базах управляющей информации. Это обеспечивает возможность контроля динамики ключевых для ФН параметров, таких как интенсивность потока заявок, время задержек, частота ошибок протоколов и т. д. Накопление и статистическая обработка этих данных [12] позволяют с высокой точностью рассчитывать вероятностные характеристики, необходимые для оценки и прогнозирования ФН.

Определив все необходимые инструменты для оценивания ФН УКСС, можно четко сформулировать задачу управления ФН. В формализованном виде данная задача выглядит следующим образом:

$$\mathbf{\Pi}_{\text{у}}^{*} = arg\max_{\mathbf{\Pi}_{\text{у}}} K_{\text{ОФГ}}\left(\mathbf{\Pi}_{\text{у}}, \Lambda_{\text{м}}, \tau_{\text{оп}}\right) \mid P_i \geq P_{i\text{доп}} \; \forall \, i \in M.$$

Здесь $\mathbf{\Pi}_{\text{у}}^{*}$ – оптимальный вектор управляющих воздействий;

$\mathbf{\Pi}_{\text{у}}$ – вектор управляющих воздействий;

$\Lambda_{\text{м}}$ – совокупность параметров модели, $\Lambda_{\text{м}} = \left\{\lambda_{ij}, F_{ij}(t)\right\}_{i,j=0}^{9}$,

где λ_{ij} – интенсивности переходов между состояниями модели, определяемые экспертно-статистическим методом;

$F_{ij}(t)$ – функции распределения времени пребывания системы в этих состояниях;

$P_{i\text{доп}}$ – допустимая вероятность безошибочного выполнения i-го процесса.

Таким образом, реализация предложенного подхода к оцениванию ФН УКСС, использующего модифицированный топологический полумарковский метод моделирования и систему расчетных показателей, основанную на статистической обработке оперативных данных мониторинга, дополненных фиксированными данными, позволяет перейти от оценивания качества выполнения отдельных процессов к получению интегральной и прогнозной оценки ФН. Такой подход создает основу для превентивного управления ФН.

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ КОММУТАЦИОННЫХ УЗЛОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Одним из ключевых способов обеспечения надежности является резервирование. В контексте ФН УКСС резервирование обеспечивается за счет использования дублирующих каналов связи, способности УКСС к частотному маневрированию, возможности регулировки характеристик передачи данных в канале связи (путем смены алгоритмов модуляции, кодирования, шифрования и т. д. на предусмотренные резервные варианты).

Ключевым способом оперативного управления ФН в контексте резервирования на этапе эксплуатации УКСС является оптимизация алгоритмов перехода системы на резервные элементы. Это достигается через оптимизацию критериев ФО резервируемых элементов. Например, решение о переключении на дублирующий канал может приниматься при достижении коэффициентом частичной функциональной готовности $K_{i\text{ФГ}}$ для процесса передачи данных порогового значения, рассчитанного с учетом текущей интенсивности трафика. Такой подход позволяет избежать преждевременных переключений из-за кратковременных помех и предотвратить пропуск момента переключения при нарастающем снижении качества связи.

Важным элементом управления ФН является организация мероприятий технического обслуживания (ТО). Повышение эффективности ТО может быть достигнуто за счет формирования системы планирования проведения ТО, учитывающей текущее и прогнозируемое состояние ФН УКСС. Это позволит избежать эксплуатации УКСС на грани ФО в ожидании очередного ТО и своевременно проводить профилактические мероприятия. Для реализации предиктивного ТО целесообразно использовать прогнозный коэффициент оперативной функциональной готовности $K_{\text{ОФГ}}$. Если для заданного оперативного интервала, например времени до проведения очередного планового ТО, значение $K_{\text{ОФГ}}$ опускается ниже установленного порога, формируется предупреждение о необходимости проведения внеплановых профилактических работ.

Для контроля потока отказов в современные технические устройства интегрируются системы диагностирования, обеспечивающие контроль технического состояния системы, достоверность результатов которого напрямую влияет на ФН [6]. При разработке системы диагностирования предварительно создается ее модель, на которой производится проверка качества ее функционирования [7]. Оптимизация критериев ФО обеспечит снижение вероятности ошибок первого и второго рода на этапе обнаружения отказа [3]. Большое значение имеет корректный выбор диагностических признаков, поскольку от их информативности зависит точность принимаемых решений о наличии или отсутствии ФО [5].

При диагностике ФО в УКСС в качестве диагностических признаков целесообразно рассматривать не только признаки аппаратных сбоев, но и отклонения значений показателей ФН. Для ускорения процесса локализации источника ФО предлагается использовать модель состояний системы, построенную на основе полумарковского метода (рис. 2). Определив по фиксируемым признакам текущее состояние системы, можно применять адресные корректи-

рующие воздействия, минуя этап полного перебора всех возможных причин ФО. Достоверность идентификации ФО зависит от правильности его локализации, а также полноты и качества статистических и экспертных данных.

Эффективность устранения отказа характеризуется полнотой и качеством проводимых наладочных мероприятий. Повысить данные характеристики позволяет внедрение рекомендательной системы. На основе экспертных данных и статистики изменений показателей ФН и успешных воздействий на элементы УКСС возможно формирование как рекомендаций по проведению ремонтных и профилактических работ для эксплуатирующего персонала, так и алгоритмов переключений и корректирующих воздействий для самой системы.

Для упреждающего управления ФН УКСС предлагается на основе статистических и экспертных данных определить тенденции в динамике изменения контролируемых параметров и показателей, указывающих на возникновение ФО в скором будущем. Устойчивая негативная динамика единичных показателей ФН, таких как P_i и $K_{i\Phi\Gamma}$ для конкретного процесса, служит ранним признаком перехода в состояние частичного или полного ФО. Своевременное обнаружение таких тенденций дает возможность на ранних стадиях выявлять предпосылки к возникновению сбойных ошибок, являющихся результатом неправильного выполнения дискретными элементами логических функций, которые могут трансформироваться в ошибки в выполнении операций, процедур, программ, задач [2]. Анализ таких тенденций в сочетании со снижением значения $K_{О\Phi\Gamma}$ должен служить сигналом для оперативного проведения углубленной диагностики и принятия превентивных мер, даже в том случае, когда текущее значение $K_{\Phi\Gamma}$ находится в допустимом диапазоне. Такой подход способствует значительному повышению оперативности в принятии мер по предупреждению ФО и планированию проведения мероприятий ТО с большей эффективностью.

В результате, объединив предложенные процедуры оценивания и управления ФН УКСС в единый методический подход, практическая реализация которого осуществляется посредством выполнения последовательности основных этапов, был сформирован алгоритм, представленный на рис. 3.



Рис. 3. Этапы методического подхода к оцениванию и управлению ФН УКСС

Таким образом, управление ФН УКСС обеспечивается за счет комплексного подхода, включающего эффективное резервирование их функциональных элементов, грамотное планирование ТО и достоверное техническое диагностирование ФО. Основой управления ФН являются качество и полнота ее оценивания, которые позволяют обеспечить алгоритмы управления не только данными о текущем состоянии системы, но и прогнозами по его изменению.

ПРОВЕРКА ПРАКТИЧЕСКОЙ ПРИМЕНИМОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА НА ЧИСЛЕННОМ ПРИМЕРЕ

Для проверки практической применимости разработанного методического подхода приводится численный расчетный пример. Он носит демонстрационный характер и отражает степень влияния управляющих воздействий на значения оценочных показателей ФН УКСС. В данном примере используются следующие исходные данные, основанные на экспертной оценке: $\lambda_{01} = 0{,}0005$; $\lambda_{12} = 0{,}0003$; $\lambda_{23} = 0{,}0001$; $\lambda_{10} = 5$; $\lambda_{20} = 0{,}01$; $\lambda_{24} = 360$; $\lambda_{34} = 360$; $\lambda_{40} = 120$; $\lambda_{45} = 120$; $\lambda_{50} = 30$; $\lambda_{06} = 0{,}00005$; $\lambda_{60} = 0{,}7139$; $\lambda_{17} = 0{,}00005$; $\lambda_{71} = 0{,}0139$; $\lambda_{28} = 0{,}00005$; $\lambda_{82} = 0{,}7139$; $\lambda_{39} = 0{,}00005$; $\lambda_{93} = 20$; $\lambda_{67} = 0{,}0005$; $\lambda_{78} = 0{,}0003$; $\lambda_{89} = 0{,}0001$; $\lambda_{76} = 5$; $\lambda_{86} = 0{,}05$; $\lambda_{42} = 1$; $\lambda_{43} = 1$; $M = 1$; $\omega_1 = 1$; $\Omega_1 = 0{,}7$ заявка/ч; $g_{1\Phi\text{Т}} = 0{,}00001$; $\tau_{\text{ОП}} = 24$ ч.

В результате подстановки исходных интенсивностей переходов между состояниями в предложенную модифицированную топологическую полумарковскую модель посредством имитационного моделирования были получены следующие численные данные: $P(S_0) = 0{,}9998$; $P(S_6) = 0{,}00007$; $\tau_3 = 0{,}0028$ ч; $\tau_4 = 0{,}00413$ ч; $\tau_5 = 0{,}034$ ч; $\tau_9 = 0{,}05$ ч.

Далее вычисляются показатели ФН первой ступени подхода к оцениванию:

$$P_1 = 0{,}9998 + 0{,}00007 = 0{,}99987;$$

$$G_1 = 1 - 0{,}99987 = 0{,}00013;$$

$$T_{1\text{ПР}} = 0{,}0028 + 0{,}00413 + 0{,}034 + 0{,}05 = 0{,}09093 \text{ ч};$$

$$K_{1\Phi\Gamma} = \frac{1/0{,}7}{1/0{,}7 + 0{,}09093} = \frac{1{,}4286}{1{,}4286 + 0{,}09093} = 0{,}940158.$$

Ввиду того, что в качестве примера рассматривается УКСС, выполняющий один основной процесс передачи данных ($M = 1$), на второй ступени оценивания ФН показатели принимают следующие значения:

$$K_{\Phi\Gamma} = 0{,}940158;$$

$$T_{\text{пр}} = 0{,}09093 \text{ ч}.$$

Вычисление показателей ФН третьей ступени позволяет сформировать прогноз ФН на оперативном интервале времени $\tau_{\text{ОП}}$:

$$T_{\Phi} = \frac{0{,}09093 \cdot 0{,}940158}{(1 - 0{,}940158) \cdot 0{,}00001} = \frac{0{,}0854885669}{0{,}00000059842} = 142857{,}1 \text{ ч};$$

$$K_{\text{ОФГ}} = 0{,}940158 \cdot e^{-24/142857{,}1} = 0{,}94.$$

Итоговое значение $K_{\text{ОФГ}}$ не обеспечивает требуемый уровень ФН. Данный факт свидетельствует о необходимости выполнения комплекса операций управления, нацеленных на повышение ФН УКСС. Перераспределение нагрузки на УКСС снижает интенсивности деградаци-

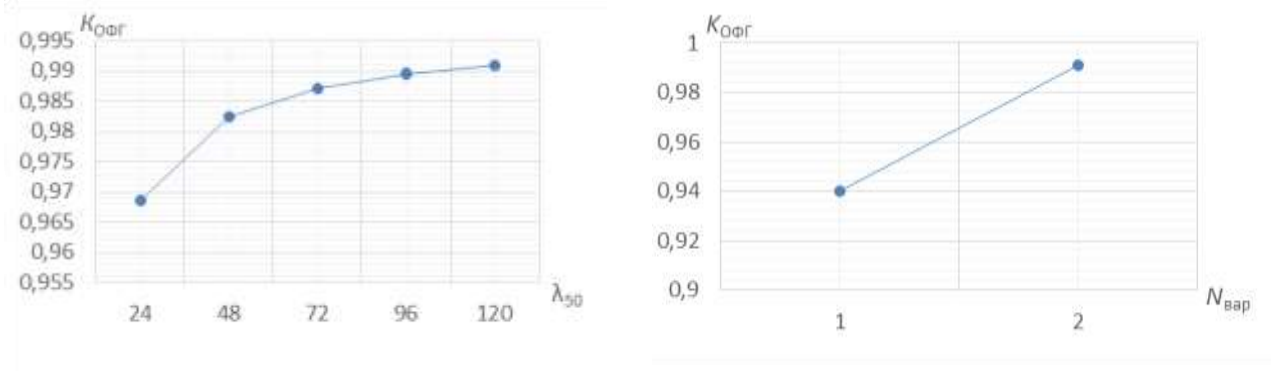
онных переходов и увеличивает интенсивности восстановительных. Дополнительная настройка алгоритмов диагностирования с учетом данных эксплуатации снижает время обнаружения и локализации отказов, что уменьшает время простоя системы при возникновении ФО.

После перераспределения нагрузки и перенастройки алгоритмов диагностирования претерпели изменение следующие интенсивности переходов между состояниями: $\lambda_{01} = 0{,}00005$; $\lambda_{12} = 0{,}00003$; $\lambda_{23} = 0{,}00001$; $\lambda_{10} = 5$; $\lambda_{20} = 0{,}1$; $\lambda_{40} = 600$; $\lambda_{45} = 600$; $\lambda_{50} = 120$; $\lambda_{93} = 300$; $\lambda_{42} = 1$; $\lambda_{43} = 1$.

При пересчете вероятностей и времен в полумарковской цепи получены следующие значения: $P(S_0) = 0{,}99992$; $P(S_6) = 0{,}00007$; $\tau_3 = 0{,}0002$ ч; $\tau_4 = 0{,}00083319$ ч; $\tau_5 = 0{,}00834$ ч; $\tau_9 = 0{,}0034$ ч.

После подстановки полученных значений в формулах (1)–(8) вычислены следующие результаты: $P_1 = 0{,}99999$; $G_1 = 0{,}00001$; $K_{ФГ} = 0{,}991188$; $T_{ПР} = 0{,}0127$ ч; $T_Ф = 142857{,}1$ ч; $K_{ОФГ} = 0{,}99 > 0{,}94$.

Таким образом, на левом графике (рис. 4,*а*) отражена зависимость коэффициента оперативной готовности УКСС ($K_{ОФГ}$) от интенсивности восстановления процесса передачи данных. Анализ графика показывает нелинейный характер роста $K_{ОФГ}$ при увеличении интенсивности восстановления, что свидетельствует о высокой чувствительности показателя к параметрам восстановительных процессов. Это подтверждает адекватность модели при варьировании параметров.



а) б)

Рис. 4. График зависимости коэффициента оперативной функциональной готовности УКСС ($K_{ОФГ}$) от значений интенсивности аварийного восстановления процесса передачи данных (а) и значения $K_{ОФГ}$ при отсутствии (вариант 1) и наличии (вариант 2) управления ФН (б)

На правом графике (рис. 4,*б*) представлены значения $K_{ОФГ}$ при различных вариантах управления ФН ($N_{вар}$): отсутствии управления ($N_{вар} = 1$), наличии управления ($N_{вар} = 2$). Полученные результаты демонстрируют увеличение $K_{ОФГ}$ за счет реализации комплекса управляющих воздействий, что подтверждает практическую применимость предложенного подхода при условии калибровки параметров модели на основе эксплуатационных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы была полностью достигнута поставленная цель, а именно разработан целостный методический подход к оцениванию и управлению ФН УКСС. Основные практические результаты работы заключаются в следующем:

– разработана и обоснована модифицированная топологическая полумарковская модель, описывающая деградацию качества выполнения процессов в УКСС;

– разработан целостный трехуровневый подход к оцениванию ФН, а также предложен переход от реактивного к превентивному управлению ФН на основе динамики ФН;

– сформулированы конкретные способы управления ФН: адаптивное управление резервированием, предиктивное ТО и целевая диагностика ФО;

– интегрированы средства оценки, прогноза и управления в единый замкнутый контур, основанный на данных стандартных систем мониторинга, например, использующих протокол SNMP.

Таким образом, предложенный подход позволяет связать управляющие воздействия, осуществляемые в ходе эксплуатации УКСС, с параметрами ФН и обеспечить переход от реактивного устранения ФО к превентивному управлению ФН на основе прогноза. Последовательность его основных этапов подтверждает практическую значимость проделанной работы. Данный подход вносит вклад в решение ключевой проблемы обеспечения ФН телекоммуникационных систем и представляет собой конкретный инструментарий для эффективного управления ФН.

Список использованных источников

1. *Шубинский И. Б.* Структурная надежность информационных систем. – М. : Журнал Надежность, 2012. – 216 с.

2. *Шубинский И. Б.* Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. – М. : Журнал Надежность, 2012. – 296 с.

3. Нейросетевой подход к контролю технического состояния бортовой радиоэлектронной аппаратуры в условиях многозначности функции выходов / А. И. Лоскутов [и др.] // Вестник НПО им. Лавочкина. – 2021. – Т. 51, № 1. – С. 52–59.

4. *Якимов В. Л., Мальцев Г. Н.* Гибридные сетевые структуры и их использование при диагностировании сложных технических систем // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21, № 1. – С. 126–160.

5. *Калюта А. Н., Мальцев Г. Н., Склемин Д. В.* Достоверность технического диагностирования сложных технических систем с использованием диагностических моделей // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2024. – Вып. 691. – С. 211–219.

6. *Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л.* Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 4(83). – С. 34–43.

7. *Назаров А. В., Якимов В. Л.* Алгоритм выбора диагностических признаков при поиске мест и причин неисправностей бортовых систем объектов ракетно-космической техники // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 641. – С. 56–60.

8. *Мальцев Г. Н., Склемин Д. В.* Оптимизация требований к показателям достоверности при многоэтапном контроле технического состояния объекта испытаний по критерию минимальной стоимости испытаний // Вооружение и экономика. – 2023. – Т. 63, № 1. – С. 53–64.

9. *Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л.* Исследование процесса диагностирования бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов с использованием дискретно-событийной имитационной модели // Труды СПИИРАН. – 2018. – Т. 56, № 51. – С. 95–121.

10. *Козинов И. А., Гришин А. В., Гришин В. В.* Методика оценивания надежности современных радиоэлектронных систем космических комплексов // Сборник докладов 75-й науч-

но-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио. – СПб., 2020. – С. 233–235.

11. *Климов С. М., Сосновский Ю. В., Чачиев Д. Р.* Методика оценки функциональной надежности компонент программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления // Надежность. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 58–65.

12. *Гришин А. В.* Применение логико-вероятностного моделирования готовности для оценивания эффективности функционирования радиоэлектронных систем космических комплексов // Сборник докладов 75-й научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио. – СПб., 2020. – С. 20–23.

Д. А. Денисенков[1],
кандидат физико-математических наук;
В. Ю. Жуков[2],
доктор физико-математических наук;
Г. Г. Щукин[3],
доктор физико-математических наук, профессор
[1] Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.
[2] Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург.
[3] Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт, г. Санкт-Петербург.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРА «ШИРИНА СПЕКТРА» ПРИНИМАЕМОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ

Рассматриваются особенности применения параметра «ширина спектра» принимаемого радиолокационного сигнала для распознавания опасных явлений погоды. Анализируются методы распознавания сдвига ветра, вертикальных воздушных потоков и смерча, основанные на оценках данного параметра. Делается вывод о его большой информативности и возможностях его использования на практике.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, дистанционное зондирование атмосферы, сдвиг ветра, микропорыв, ширина спектра сигнала, база сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Современные метеорологические радиолокаторы оценивают шесть параметров входного сигнала: мощность, два спектральных (средняя частота и ширина спектра) и три поляризационных параметра. При этом ширина спектра до сих пор остается самым малоиспользуемым из них [1]. Считается, что на ее значение влияет слишком много явлений [2] различного рода: разница в скоростях гравитационного падения частиц, модуляция диаграммой направленности антенны при ее вращении, турбулентность и сдвиг ветра. Ввиду этого однозначно трактовать какие-то изменения в величине этого параметра невозможно, из-за чего он используется только как дополнительный, подтверждающий элемент при распознавании явления с использованием какого-либо другого параметра сигнала.

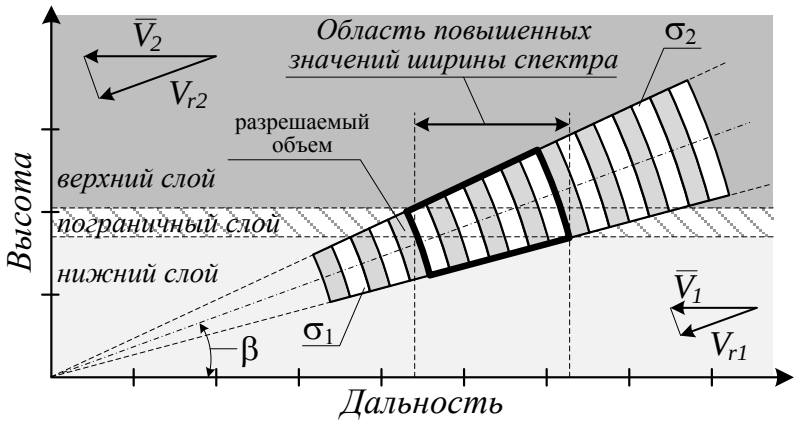
Однако если проанализировать вышеизложенное, то становится ясно, что вклады перечисленных факторов в ширину спектра неравнозначны. Влияние скорости гравитационного падения частиц при малых углах места антенны, характерных для обычных наблюдений, практически нулевое. Модуляция за счет вращения антенны может быть легко учтена или минимизирована за счет снижения скорости сканирования, что и происходит в режиме «скорость» современных радиолокаторов. Интенсивность турбулентности в облаках, как показывают аэрологические исследования [3], настолько мала, что не в состоянии существенно влиять на ширину спектра. Остается сдвиг ветра, а также ряд других опасных явлений, связанных с ветром, влияние которых на ширину спектра отраженного радиолокационного сигнала позволяет метеорологическому радиолокатору их обнаруживать.

ОБНАРУЖЕНИЕ СДВИГА ВЕТРА

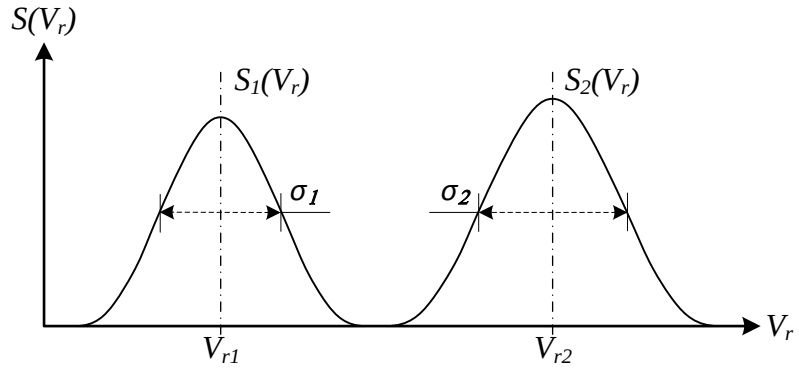
Сдвиг ветра в случае малых значений градиента по высоте не может быть идентифицирован по величине рассматриваемого параметра, но поскольку такое состояние атмосферы опасным не является, то и задачи обнаружить его нет. Если же указанные градиенты приоб-

ретают значения более 4 м/с на 30 м высоты, положение резко меняется, и такие сдвиги ветра необходимо обнаруживать из-за их большой опасности для авиации [4]. Существовать они могут только внутри узкого слоя атмосферы, что делает возможным рассматривать окружающее пространство как две однородные массы воздуха, между которыми лежит узкий пограничный слой (рис. 1,*а*), не создающий достаточно мощного сигнала для того, чтобы учитывать его при дальнейшей обработке.

В указанных условиях спектр сигнала, принимаемого от разрешаемого объема, внутрь которого попадают участки обеих однородных масс, оказывается состоящим из двух гауссиан с разными значениями средней частоты, т. е. двухмодальным (рис. 1,*б*). При приблизительном равенстве мощностей частей сигнала, отраженных от указанных масс, ширина такого спектра резко увеличивается и становится аномально большой – в 2 и более раза больше тех ее значений, что имеют место при наблюдении однородных масс [5]. Такой резкий скачок уже нельзя считать вызванным различными явлениями, и он однозначно трактуется как результат наблюдения опасного сдвига ветра.



а)



б)

Рис. 1. Формирование двухмодального спектра радиолокационного сигнала, где V_1, V_2 – скорости ветра в нижнем и в верхнем слое; φ_1, φ_2 – направления ветра в нижнем и в верхнем слое; V_{r1}, V_{r2} – среднее значение радиальной скорости частиц в нижнем и в верхнем слое; $S_1(Vr)$, $S_2(Vr)$ – спектральные составляющие, соответствующие нижнему и верхнему слою; σ_1, σ_2 – ширины спектра сигнала, отраженного от нижнего и верхнего слоя

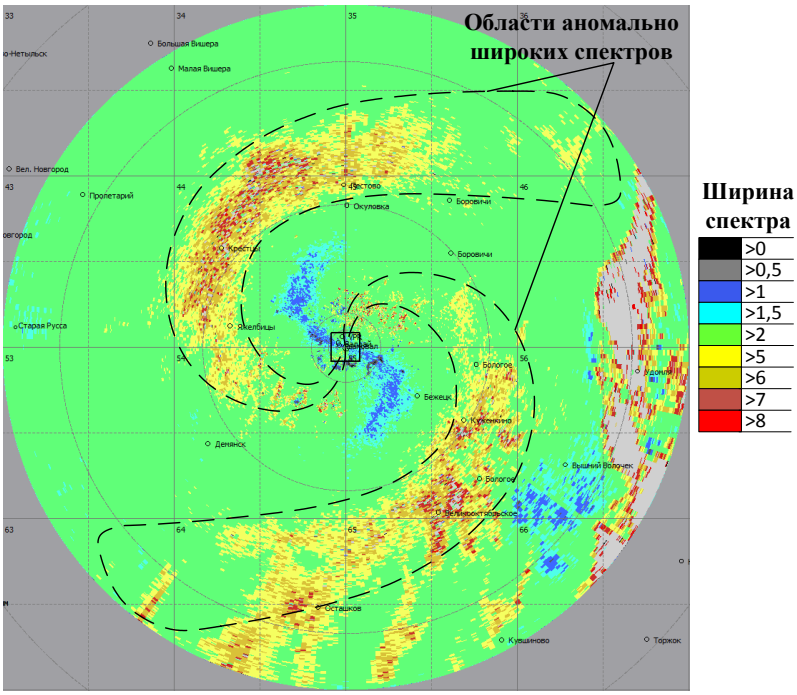


Рис. 2. Карта распределения ширины спектра по коническому разрезу, с отмеченной зоной аномально широкого спектра в виде спиралей повышенных значений, полученная радиолокатором ДМРЛ-С

Вместе тем величина рассматриваемого параметра зависит от векторов скорости ветра в каждой из однородных масс воздуха и азимута, под которым наблюдается данное явление. Поскольку антенна постоянно вращается, величина ширины спектра рассматриваемого сигнала модулируется и на карте параметра образуются характерные области (рис. 2), по параметрам которых (максимальному значению и их расположению на карте) легко восстанавливаются параметры сдвига ветра (сдвиг по величине, по направлению [6] и высота расположения). Отличительной чертой разработанного метода является отсутствие жестких требований к ширине луча антенны и длительности зондирующего импульса, имеющих место при традиционном обнаружении сдвига ветра по оценкам средней частоты спектра.

ОБНАРУЖЕНИЕ ВОСХОДЯЩИХ И НИСХОДЯЩИХ ПОТОКОВ

Очевидно, что ключевым моментом, на основе которого строится приведенный выше метод, является большая протяженность рассматриваемого явления в горизонтальной плоскости, что позволяет применять эффект модуляции данных оценок при вращении антенны. Одновременно в окружающем пространстве существует целый ряд опасных явлений, также связанных с ветром, но не обладающих указанной особенностью. Имеются в виду восходящие конвективные потоки воздуха, нисходящие потоки типа микрошквала и смерча [7]. Локальность перечисленных явлений не позволяет применить к ним метод, разработанный для распознавания сдвига ветра.

Однако к ним можно применить более широкий принцип, положенный в основу рассмотренного метода – неоднородность суммарного спектра сигнала, полученного от разрешающего объема, внутрь которого попадают области двух различных однородных масс. Под последними в данном случае понимаются вертикальный столб воздуха с существующим внутри него опасным явлением и окружающее его пространство. Используемой в ранее рассмотренном методе разницы между величинами средних значений спектра отражений от

каждой из масс здесь не наблюдается. Единственное различие, которое можно использовать, – разные значения ширины спектров этих сигналов. Выявить такую неоднородность – не простая задача. На помощь приходит хорошо разработанная в области радиолокации и радиосвязи теория сложных сигналов. В ней показателем «сложности» служит параметр «база сигнала», определяемый как произведение длительности импульса на ширину его спектра.

В нашем случае понятие длительности импульса отсутствует, так как мы имеем дело со случайным процессом, длительность которого ограничивается условиями радиолокационных наблюдений. Поэтому приходится искать аналоги указанным величинам, определяющим базу [8]. Такими аналогами являются интервал корреляции (σ_τ) и ширина энергетического спектра (σ_ω) принимаемого сигнала.

Отражения от однородной воздушной массы имеют гауссов энергетический спектр, для которого характерно равенство

$$\sigma_\tau \sigma_\omega = 1,$$

где

$$\sigma_\tau = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \tau^2 r(\tau) d\tau}\ ,\ \sigma_\omega = \sqrt{\frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \omega_0)^2 S(\omega) d\omega}\ ,$$

Здесь $r(\tau)$, $S(\omega)$, P – это нормированная корреляционная функция, энергетический спектр и мощность входного случайного процесса соответственно.

Если же спектр состоит из двух гауссиан, данное равенство не выполняется и величина базы становится тем больше, чем больше разница параметров (в данном случае ширины) каждой из них. Описанная особенность позволяет распознавать перечисленные выше опасные явления, что до сих пор было недостижимо.

На рис. 3 представлен пример результата моделирования наблюдения радиолокатором неоднородности поля ветра в виде вертикального потока на фоне невозмущенной атмосферы. Причем размер неоднородности был выбран в 2 раза меньше размера разрешаемого объема радиолокатора.

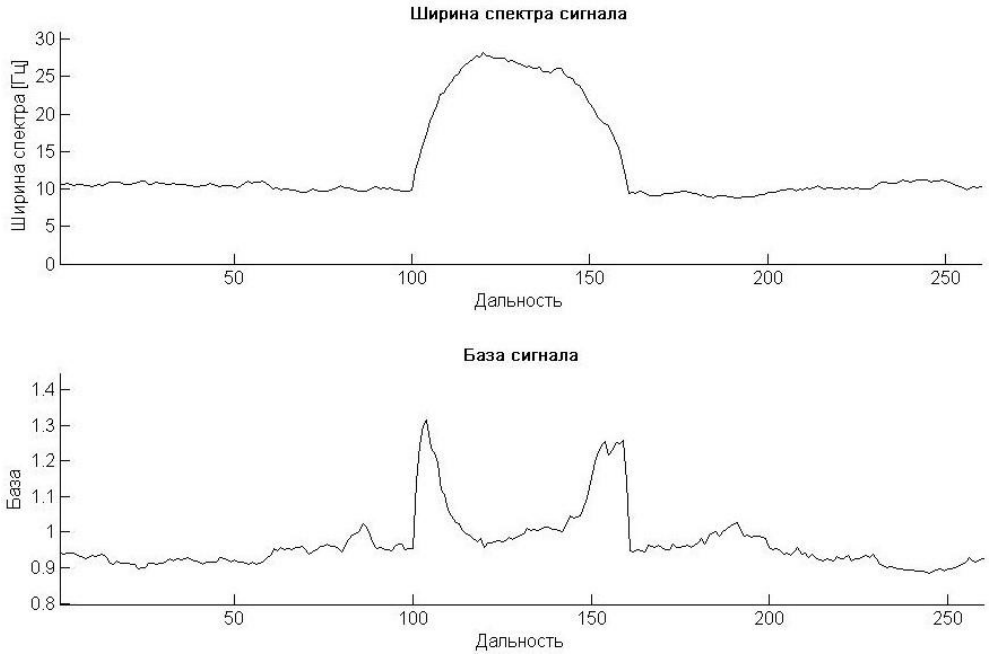


Рис. 3. Зависимости оценок ширины спектра сигнала и его базы при размере области потока, равной половине разрешаемого объема

В данном случае рассматривался вариант (рис. 4), когда средние частоты отражений от одновременно находящихся в элементе разрешения воздушных масс неоднородности и фона равны. Различались только значения ширины их энергетических спектров и мощности. Именно такая ситуация складывается при наблюдении радиолокатором вертикальных потоков под малыми углами места или зоны порыва под углом 90 градусов к скорости ветра, что делает невозможным обнаружение опасного явления при помощи методов, основанных на оценках средней частоты сигналов. Применение метода на основе совместного использования обеих оценок ширины энергетического спектра и базы сигнала позволяет эффективно распознать возникающие в рассматриваемом случае опасные участки. На графиках хорошо видна реакция обоих параметров на существование неоднородности. Ширина спектра плавно увеличивается при «заходе» разрешаемого объема на зону потока и также плавно спадает при «выходе» из него. База же четко обозначает опасные места, где имеется резкий переход от одной зоны к другой.

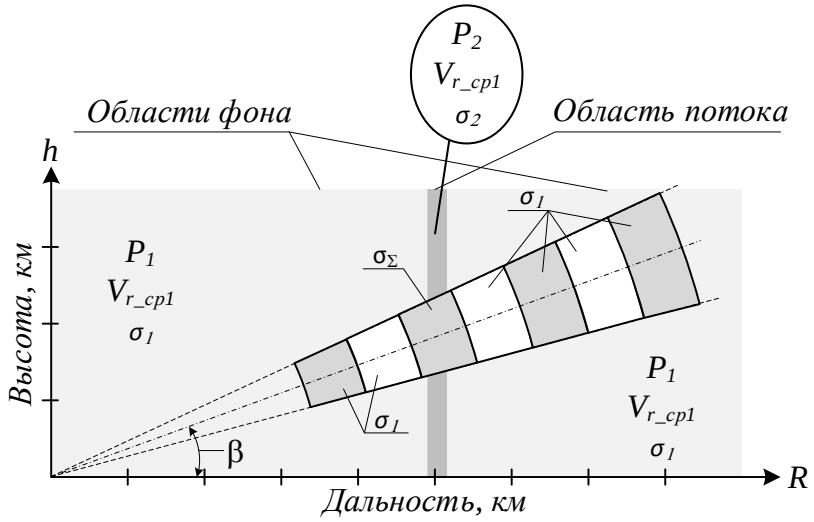


Рис. 4. Модель среды с областью вертикального потока, где V_{r_cp1} – средние радиальные скорости; P_1, P_2 – мощности отражений от области фона и области потока соответственно; σ_1, σ_2, σ_Σ – ширины энергитического спектра сигнала, отраженного от области фона, от области потока и суммарного сигнала соответственно

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышеизложенного следует, что параметр «ширина спектра» несет большое количество информации о наблюдаемой метеорологической цели и не должен считаться «изгоем» среди других, оцениваемых современным радиолокатором параметров сигнала. Его применение позволяет распознавать такие опасные явления, которые недоступны для методов, основанных на оценках последних, и должно внедряться в практику радиолокационных метеорологических наблюдений.

Список использованных источников

1. Новые возможности радиолокационных методов метеорологического обеспечения авиации ВМФ / Г. Г. Щукин [и др.] // Навигация и гидрография. – 2015. – № 41. – С. 59–67.

2. *Денисенков Д. А., Жуков В. Ю.* О влиянии сдвига ветра на пространственное распределение ширины спектра радиолокационного сигнала // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 1 (21). – С. 5–14.

3. *Толмачева Н. И.* Исследование характеристик турбулентности в облаках и безоблачной атмосфере // Географический вестник. Метеорология. – 2015. – № 2(33). – С. 46–55.

4. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах : руководящий документ РД. – Монреаль : Международная организация гражданской авиации, 2008. – 258 с.

5. Исследование эффективности метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д. А. Денисенков [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 42. – С. 109–116.

6. *Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Щукин Г. Г.* О возможности измерения сдвига ветра по направлению в доплеровском метеорологическом радиолокаторе // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 662. – С. 124–128.

7. *Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Щукин Г. Г.* Обнаружение вертикальных потоков воздуха радиолокационными методами // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 160–165.

8. *Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Щукин Г. Г.* Применение параметра «база сигнала» для радиолокационного распознавания опасных явлений // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69, № 6. – С. 589–592. – DOI : 10.31857/S0033849424060126.

А. Н. Калюта,
кандидат технических наук

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ПРИМЕНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «МЕТЕОР-М»

Рассмотрены задачи космической системы гидрометеорологического обеспечения «Метеор-3М» и их реализация космическими аппаратами типа «Метеор-М». Дана характеристика бортового информационного комплекса наблюдения и сбора информации КА «Метеор-М». Бортовые системы наблюдения и сбора информации в оптическом и радиотехническом диапазонах позволяют, наряду с решением задач гидрометеорологического обеспечения различных классов потребителей, эффективно использовать их и для решения других задач дистанционного зондирования Земли. Приведены основные характеристики бортовых систем сбора информации и технологические циклы их применения в сеансном и непрерывном режимах, а также технологические циклы управления космическими аппаратами «Метеор-М» в процессе их летной эксплуатации. Представлены структурно-функциональные схемы наземного специального комплекса и наземного комплекса управления космической системы «Метеор-3М».

Ключевые слова: космический аппарат «Метеор-М», гидрометеорологическая информация, технологические циклы применения и управления, наземный комплекс управления.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из основных отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли является космическая система гидрометеорологического обеспечения «Метеор-3М» на основе космических аппаратов (КА) «Метеор-М». Космическая система предназначена для мониторинга поверхности Земли, атмосферы и околоземного космического пространства в целях получения глобальной гидрометеорологической информации и прогноза погоды [1, 2]. КА «Метеор-М», оснащенные различными видами бортовых систем наблюдения и сбора информации в оптическом и радиотехническом диапазонах, – это многоцелевые КА, которые наряду с гидрометеорологическим обеспечением различных классов потребителей эффективно используются при решении ряда других задач дистанционного зондирования Земли.

Применение КА по назначению в процессе летной эксплуатации обеспечивается реализацией запланированной программы работы бортового специального комплекса, для КА «Метеор-М» – бортового информационного комплекса наблюдения и сбора информации, и управлением КА средствами наземного комплекса управления. В статье рассмотрены технологические циклы функционирования бортового информационного комплекса и технологические циклы управления КА средствами наземного комплекса управления, обеспечивающие применение КА «Метеор-М» для решения целевых задач.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «МЕТЕОР-М»

Запуски КА «Метеор-М», начиная с 2009 года, обеспечили воссоздание отечественной метеорологической орбитальной группировки и формирование современной космической системы гидрометеорологического обеспечения «Метеор-3М». Всего было выведено на орбиту пять КА типа «Метеор-М», имеющих некоторые различия в комплектации бортового информационного комплекса наблюдения и сбора информации [3, 4]. Последний из запусков состоялся в 2024 году. Сейчас на орбите находятся в летной эксплуатации и применяются по назначению четыре КА. Ближайшие запуски запланированы на 2026–2027 годы.

Космические аппараты «Метеор-М» функционируют на солнечно-синхронных орбитах высотой около 830 км с наклонением 98,7°, что обеспечивает глобальность съемки поверхности Земли и мониторинга атмосферы бортовыми системами наблюдения и сбора информации. Период обращения КА составляет около 100 мин, межвитковый интервал трассы полета на поверхности Земли – 2820 км. Стартовая масса КА составляет около 3000 кг, масса полезной нагрузки – около 1200 кг. Внешний вид КА «Метеор-М» показан на рис. 1.

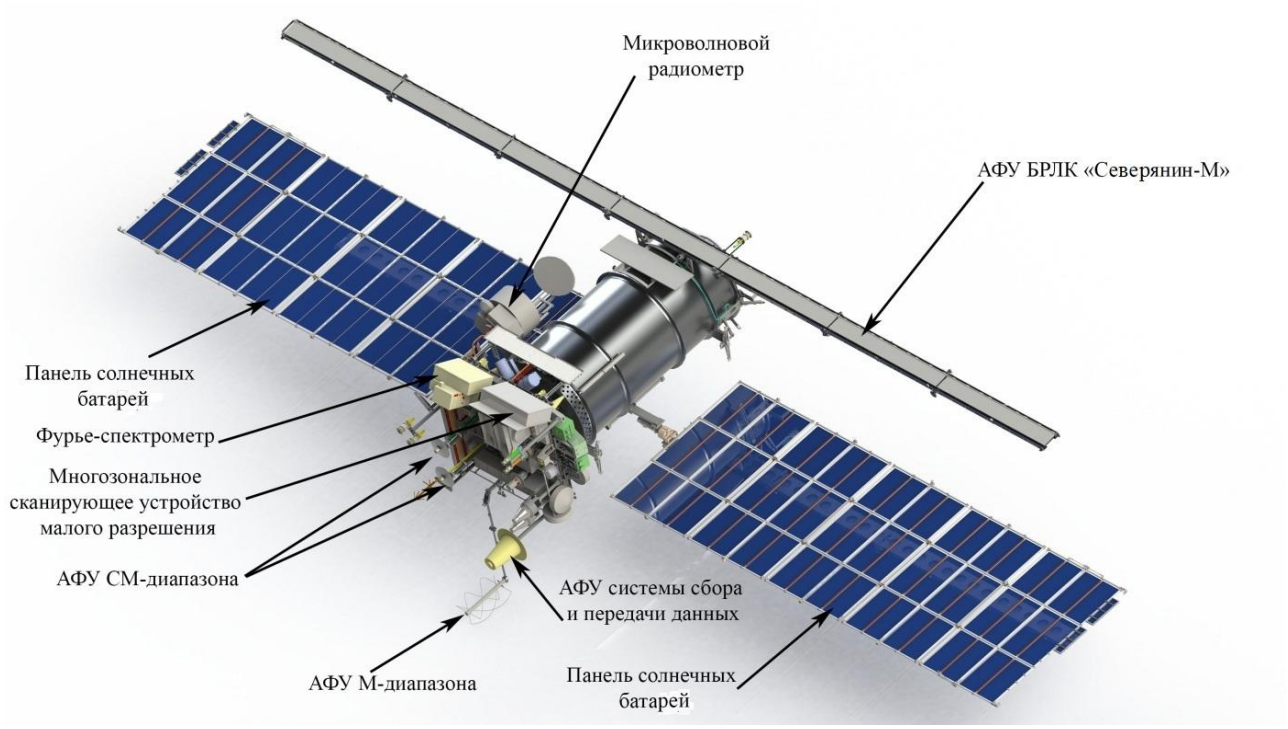


Рис. 1. Внешний вид КА «Метеор-М» и расположение бортовых систем наблюдения и сбора информации

Бортовой информационный комплекс наблюдения и сбора информации КА «Метеор-М» обеспечивает получение данных в интересах оперативной метеорологии, мониторинга климата и окружающей среды, гидрологии и геофизики. Для решения целевых задач бортовые системы наблюдения и сбора информации выполняют:

– глобальную съемку поверхности Земли в видимом диапазоне спектра;

– глобальную съемку поверхности Земли в инфракрасном и радиотехническом диапазонах спектра;

– локальную съемку заданных районов Земли в видимом и радиотехническом диапазонах спектра;

– регистрацию потоков ионизирующих излучений на высоте орбиты КА;

– зондирование газового состава атмосферы и температурно-влажностного режима атмосферы, океана и суши;

– дистанционное измерение температуры подстилающей поверхности Земли;

– прием информации с автоматических метеорологических платформ сбора данных.

Съемка в видимом диапазоне спектра осуществляется на освещенной стороне Земли. Съемка в инфракрасном и радиотехническом диапазонах спектра проводится на освещенной и на теневой стороне Земли. Глобальная съемка и локальная в радиотехническом диапазоне выполняется бортовым радиолокационным комплексом. Локальная съемка в видимом диапазоне – многозональным съемочным комплексом. Зондирование температурно-влажностного режима атмосферы, океана и суши реализуется микроволновым радиометром. По результатам

съемки строятся обзорные и локальные карты облачности. Регистрация потоков ионизирующих излучений на высоте орбиты КА проводится в интересах контроля гелиогеофизической обстановки в околоземном космическом пространстве.

При ширине полосы обзора бортовых информационно-измерительных систем не меньше ширины межвиткового интервала сбор глобальной информации осуществляется 2 раза в сутки. В результате период обновления гидрометеорологических данных составляет 12 часов. Все данные съемки, мониторинга атмосферы и окружающей среды и информация, принятая с метеорологических платформ, передаются с КА по радиоканалам на наземные пункты приема информации (ППИ) наземного комплекса приема, обработки и распространения информации (НКПОР). НКПОР является наземным специальным комплексом космической системы и осуществляет планирование применения КА по назначению, прием, предварительную и тематическую обработку, хранение и распространение всех видов информации, принятой с КА. Управление КА в процессе летной эксплуатации на всех этапах полета осуществляется взаимодействующим с НКПОР наземным комплексом управления (НКУ).

БОРТОВОЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС И НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС ПРИЕМА, ОБРАБОТКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Для отдельных образцов КА комплектация бортового информационного комплекса наблюдения и сбора информации может отличаться, кроме того, на КА может устанавливаться дополнительная научная аппаратура. В состав аппаратуры бортового информационного комплекса КА «Метеор-М» могут входить следующие системы:

МСУ-МР – многозональное сканирующее устройство малого разрешения;

БРЛК – бортовой радиолокационный комплекс;

КМСС – комплекс многозональной спектральной съемки среднего разрешения;

МТВЗА – микроволновый радиометр температурно-влажностного зондирования атмосферы;

ИКФС – инфракрасный Фурье-спектрометр;

ГГАК – гелиогеофизический аппаратурный комплекс;

КООС – комплекс океанографических оптических сканеров;

БИС – бортовая информационная система;

БРК ССПД – бортовой радиокомплекс системы сбора и передачи данных.

Основными бортовыми системами наблюдения и сбора информации, которые устанавливаются на все КА типа «Метеор-М», являются МСУ-МР, БРЛК, КМСС, МТВЗА и БРК ССПД. Также на всех КА типа «Метеор-М» устанавливается БИС для передачи информации с КА на ППИ НПКОР по радиоканалам. БИС включает подсистемы передачи информации по радиолиниям в М-диапазоне (БИС-МВ) и в ДМ- и СМ-диапазонах (БИС-М). Работа этих элементов бортового информационного комплекса осуществляется в соответствии с технологическими циклами применения КА «Метеор-М».

Устройство МСУ-МР, радиометр МТВЗА, радиокомплекс БРК ССПД, подсистема БИС-М ДМ-радиолинии и подсистема БИС-МВ М-диапазона работают в непрерывном режиме. МСУ-МР осуществляет съемку в широкой полосе обзора в оптическом диапазоне в шести спектральных диапазонах в видимой и ИК-области спектра с разрешением 1 км. МТВЗА осуществляет температурно-влажностное зондирование атмосферы, океана и суши на различных частотах в микроволновом диапазоне с разрешением от нескольких десятков до нескольких сотен километров. БРК ССПД осуществляет сбор и передачу гидрометеорологических данных от автоматических метеорологических платформ и может одновременно принимать информацию от 150 платформ. БИС-М ДМ-диапазона и БИС-МВ М-диапазона обеспечивают передачу информации с КА на наземные ППИ в режиме непосредственной передачи.

Комплексы БРЛК, КМСС и подсистема БИС-М СМ-диапазона циклически включаются по программе работы бортового информационного комплекса на каждом витке в так называемом сеансном режиме продолжительностью 10–20 мин. БРЛК осуществляет сканирование поверхности Земли в микроволновом диапазоне с разрешением 0,5–1 км. КМСС осуществляет получение многозональных изображений подстилающей поверхности Земли в оптическом диапазоне в трех спектральных диапазонах в видимой и ближней ИК-области с разрешением 60–120 м. Причем наибольшая эффективность целевого применения БРЛК и КМСС достигается при реализации мониторингового режима при условии ежедневной их совместной работы на перекрывающихся сеансных интервалах и на одной и той же совокупности суточных витков. БИС-М СМ-диапазона обеспечивает передачу информации с КА на наземные ППИ в режимах непосредственной передачи или воспроизведения.

На рис. 2 показаны структурно-функциональная схема НКПОР космической системы «Метеор-3М» и направления передачи с КА данных наблюдения и сбора информации с использованием подсистем БИС. Информация от аппаратуры постоянного включения КА «Метеор-М» передается по радиолиниям ДМ- и М-диапазонов. Информация от аппаратуры КА «Метеор-М», работающей в сеансном режиме, передается по радиолинии СМ-диапазона.

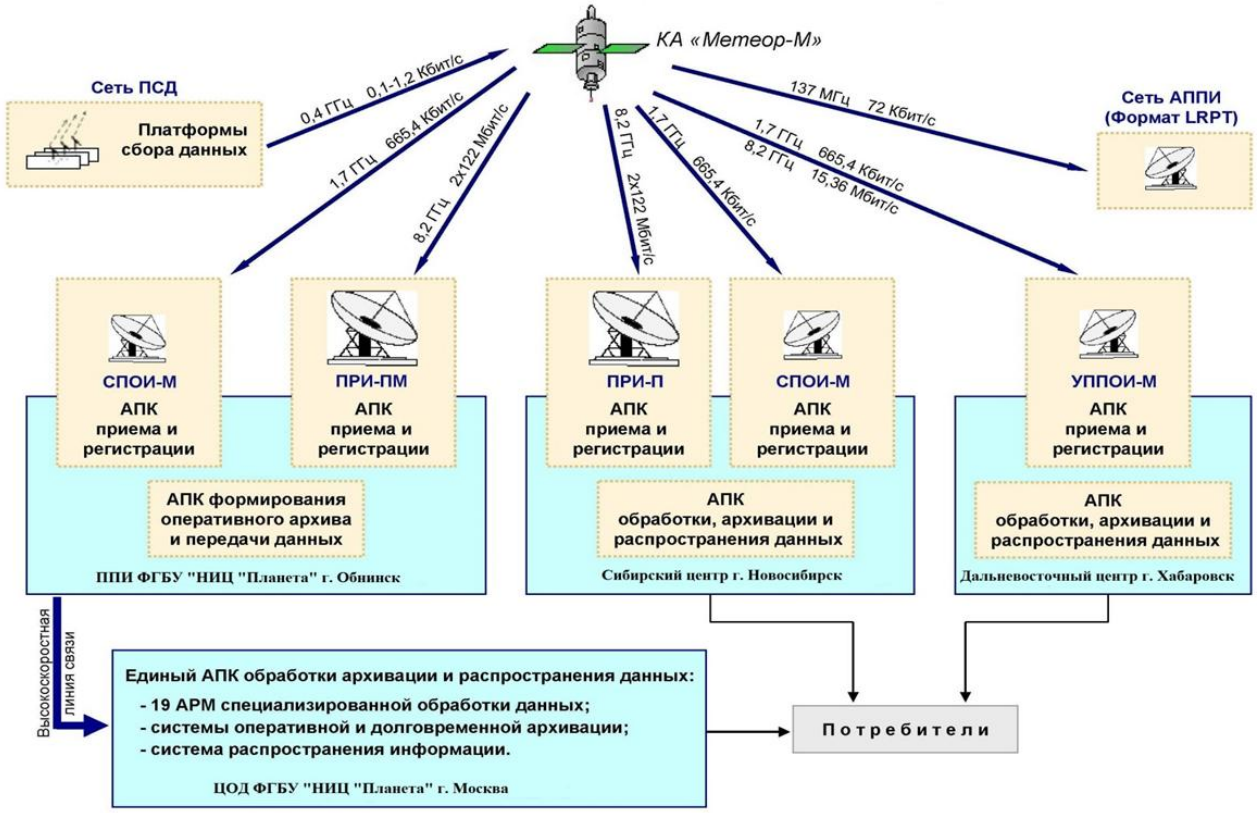


Рис. 2. Структурно-функциональная схема НКПОР космической системы «Метеор-3М»

Вместе с тем НКПОР функционирует в составе ФГБУ «НИЦ «Планета» – оператора отечественных космических систем гидрометеорологического назначения. В НКПОР входят:

– Главный (Европейский) центр приема, обработки, хранения и распространения метеорологических данных ФГБУ «НИЦ «Планета» – Центр Росгидромета по эксплуатации космических систем гидрометеорологического и океанографического назначения в г. Москве с ППИ в г. Долгопрудном и в г. Обнинске.

– Сибирский центр приема и обработки данных ФГБУ «НИЦ «Планета» с ППИ в г. Новосибирске;

– Дальневосточный центр приема и обработки данных ФГБУ «НИЦ «Планета» с ППИ в г. Хабаровске;

– автономные ППИ, расположенные в территориальных подразделениях Росгидромета;

– сеть метеорологических платформ сбора данных, оснащенных абонентской аппаратурой передачи данных (ААПД);

– средства связи и передачи данных для внутреннего обмена информацией в НКПОР и передачи данных внешним потребителям.

НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 3 показана структурно-функциональная схема НКУ КА «Метеор-М». НКУ обеспечивает автоматизированное управление КА в орбитальном полете совместно с бортовым комплексом управления (БКУ) КА, а также осуществляет информационное взаимодействие с внешними организациями, участвующими в управлении КА. НКУ функционирует в составе Наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ). В НКУ входят:

– Центр управления полетом (ЦУП);

– наземные радиоэлектронные средства управления и приема информации с КА, расположенные на территориально разнесенных командно-измерительных пунктах (КИП) НАКУ;

– баллистический центр (БЦ) и центр системы информационно-телеметрического обеспечения (ЦСИТО) НАКУ – входят в НКУ функционально;

– система связи и передачи данных (ССПД) НКУ, включающая выделяемые для НКУ каналы ССПД НАКУ;

– программно-математическое обеспечение средств НКУ.

Наземными радиоэлектронными средствами управления и приема информации с КА в составе НКУ являются наземные станции командно-измерительных систем (НС КИС) и наземные приемно-регистрирующие станции приема телеметрической информации (НПРС, МПРС). В состав ССПД НКУ входят наземные каналы связи и каналы системы спутниковой связи «Приморец».

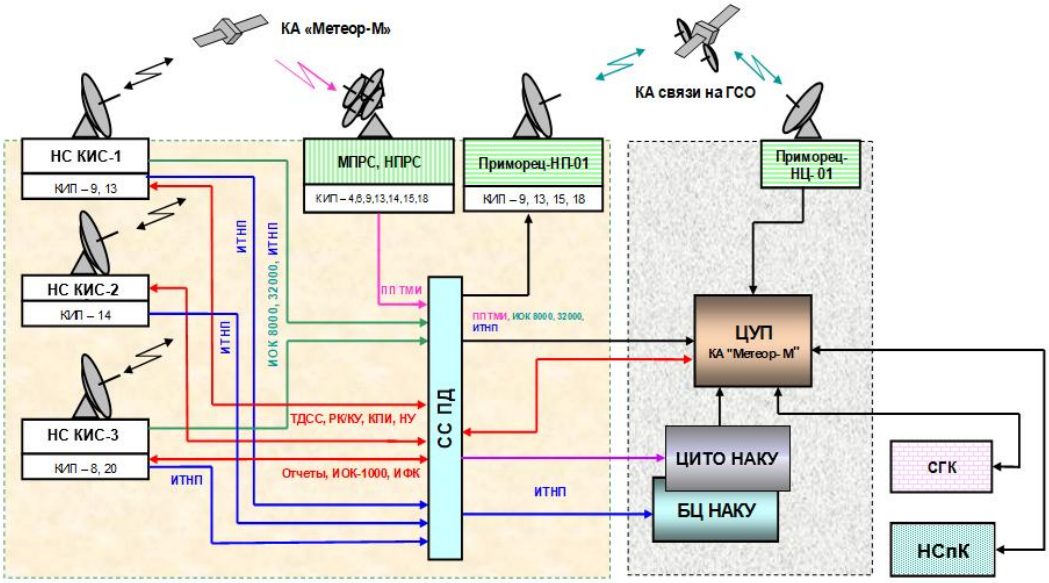


Рис. 3. Структурно-функциональная схема НКУ КА «Метеор-М»

Управление КА средствами НКУ осуществляется в ходе сеансов управления, во время которых на КА передаются формализованные управляющие воздействия, проводятся изме-

рения текущих навигационных параметров (ИТНП) КА и прием с КА телеметрической информации (ТМИ) о состоянии бортовых систем. При проведении сеансов управления НС КИС передают на КА по радиоканалу программы и команды управления, рассчитанные в ЦУП КА. Эти управляющие воздействия поступают в БКУ КА через входящую в его состав бортовую аппаратуру (БА) КИС. БКУ реализует выполнение на КА трех видов программ управления бортовой аппаратурой: предварительно (при наземной подготовке КА) записанных в БКУ, принятых от НКУ в ходе сеансов управления КА, рассчитанных в БКУ в ходе полета КА. БА КИС может работать в дежурном и сеансном режимах. В дежурном режиме работает только ее приемная часть. В сеансном режиме работают ее приемная и передающая части. Переход БА КИС из дежурного в сеансный режим происходит по командам от НКУ и БКУ. При этом НС КИС кроме передачи на КА управляющих воздействий осуществляет ИТНП КА. Станциями НПРС принимается ТМИ о состоянии бортовых систем КА, МПРС. Центр управления полетом КА взаимодействует с наземным специальным комплексом (НСпК) и стендом главного конструктора (СГК) предприятия-разработчика КА.

Технологический цикл управления (ТЦУ) КА представляет собой повторяющуюся совокупность операций управления и информационного обмена с КА на суточном интервале времени, предусмотренную эксплуатационной документацией и обеспечивающую решение КА целевых задач с требуемым качеством. Формирование ТЦУ КА осуществляется для типовых суток полета. При штатном функционировании КА и средств НКУ в каждые сутки полета реализуется свой типовой ТЦУ КА, соответствующий программе использования бортового специального комплекса, для КА «Метеор-М» – бортового информационного комплекса наблюдения и сбора информации.

ТЦУ КА включают операции командно-программного обеспечения (КПО), навигационно-баллистического обеспечения (НБО) и информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) – трех групп функциональных задач, составляющих управление КА в широком смысле слова [5]. Деление операций управления КА на операции КПО, НБО и ИТО сложилось в результате многолетней практики и согласуется с представлением КА, как активного подвижного объекта управления, тремя подсистемами: движения, аппаратуры и целевой.

При реализации ТЦУ КА «Метеор-М» операции КПО и НБО выполняются НС КИС, а для выполнения операций ИТО используются станции НПРС и МПРС. В сутки КА совершает более десятка витков, и продолжительность зон радиовидимости КА наземными радиоэлектронными средствами (НС КИС, НПРС, МПРС) не превышает нескольких десятков минут. Обычно для проведения сеансов управления КА в течение суток выбираются два витка: основной и резервный. Для каждого сеанса управления планируются передача на КА формализованных управляющих воздействий в форме разовых команд и временных программ, прием с КА информации обратного контроля и проведение ИТНП. Для приема ТМИ с КА предусматриваются режимы непосредственной передачи и воспроизведения информации.

Таким образом, при штатных ТЦУ интервал автономности функционирования КА «Метеор-М» составляет до суток. При этом период проведения сеансов управления КА определяется прежде всего необходимостью оперативного задания районов съемки для бортовых систем сбора информации, работающих в сеансном режиме. В отсутствие необходимости оперативного задания районов съемки возможно увеличение интервала автономности функционирования КА до 2-3 суток при использовании возможностей БКУ по автономному управлению бортовым информационным комплексом по заданной программе съемки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидрометеорологическое обеспечение различных классов потребителей является в настоящее время одной из основных задач дистанционного зондирования Земли из космоса. Современные космические метеорологические системы обеспечивают проведение глобальных

наблюдений за метеорологическими процессами в атмосфере Земли. На основании данных, полученных метеорологическими КА, осуществляется изучение различных гидрометеорологических явлений, составляются краткосрочные и долгосрочные прогнозы погоды.

Аппаратура бортового информационного комплекса наблюдения и сбора информации КА «Метеор-М» позволяет получать различные виды информации, которые могут быть использованы для решения комплекса задач мониторинга атмосферы, поверхности Земли и околоземного космического пространства. Представленные технологические циклы применения и управления КА «Метеор-М» позволяют проанализировать их информационные возможности и особенности управления КА для обеспечения решения прикладных задач.

Список использованных источников

1. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 2 / под ред. Л. А. Макриденко [и др.]. – М. : Корпорация ВНИИЭМ, 2014. – 158 с.

2. *Толмачева Н. И.* Космические методы исследований в метеорологии. Интерпретация спутниковых изображений. – Пермь : Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2012. – 208 с.

3. *Горбунов А. В., Чуркин А. Л., Павлов Д. А.* Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» // Вопросы электромеханики. – 2008. – Т. 105. – С. 17–28.

4. *Чуркин А. Л.* Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» со спутником «Метеор-М» // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 79–85.

5. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления / под ред. Ю. С. Мануйлова. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. – 610 с.

Б. Н. Корнеев;
Ю. В. Левадный,
кандидат военных наук, доцент;
А. В. Соловьев,
кандидат технических наук;
И. В. Чернов,
кандидат технических наук, доцент

СПОСОБЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ ПУНКТОВ (МОБИЛЬНЫХ МАРОК)

Статья посвящена решению проблемы геодезического обеспечения аэрокосмических съемок труднодоступных территорий, где невозможна наземная полевая подготовка. Отсутствие опорных точек на таких участках существенно снижает точность создаваемых карт и ортомозаик. Автором предлагаются новые способы оптико-электронной топографической съемки, основанные на использовании динамических опорных пунктов – летательных аппаратов-марок (ЛАМ). Координаты ЛАМ в момент съемки определяются с высокой точностью бортовыми навигационными системами, а сами они выступают в роли видимых на снимках опорных точек. В работе представлены два основных способа реализации метода, включая варианты со вспомогательными камерами. Выполнено априорное оценивание точности: выведены аналитические зависимости и выполнены расчеты для условий космической сканерной съемки. Результаты показывают, что применение четырех ЛАМ позволяет определять координаты объектов на недоступной территории со среднеквадратической погрешностью порядка 1,5 м (сопоставимо с традиционными методами), но при этом обеспечивает независимый контроль точности геопривязки непосредственно по материалам съемки.

Ключевые слова: аэрокосмическая съемка, дистанционное зондирование Земли, фотограмметрия, геопривязка, геодезическая основа, недоступная территория, динамический опорный пункт, летательный аппарат-марка, мобильная марка, топографическая камера, элементы внешнего ориентирования, априорная оценка точности, стереосъемка.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках геоинформационного обеспечения большое внимание уделяется исследованиям (с применением аэрокосмической съемки) поверхности Земли, ее недр и атмосферы, причем как частным коммерческим (мелким и крупным) инициативам, так и государственным проектам стратегического уровня планирования. Примером такого государственного проекта может служить пополнение орбитальной группировки в 2024 году оптико-электронными (ОЭ) спутниками дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Ресурс-П» № 4 и «Ресурс-П» № 5 [1].

В 2025 году успешно выведены на целевую орбиту спутники ДЗЗ «Аист-2Т» № 1 и 2 со стереоскопическими аппаратами, а в 2026-2027 годах ожидаются выведение на орбиту модернизированных спутников «Ресурс-ПМ» № 1 и 2 и продолжение реализации проекта «Сфера» [1]. Пополнение спутниковой группировки влечет за собой рост объема данных ДЗЗ, для которого требуется разработка проектов по автоматизации сбора, обработки и анализа данных различных систем ДЗЗ, например, создание проекта информационная система «Цифровая Земля» и ее подсистемы обработки данных [2, 3].

Информационная система «Цифровая Земля» уже позволяет [4]: автоматически формировать высококачественные стандартные продукты ДЗЗ уровней обработки L1, L2 [ГОСТ Р 59480-2021]; автоматически формировать производные продукты ДЗЗ уровня обработки L3 [ГОСТ Р 59480-2021], в том числе высокоточные бесшовные сплошные покрытия (ортомозаики); оперативно в автоматическом режиме обрабатывать весь архив данных российской ор-

битальной группировки космических аппаратов ДЗЗ как единое сплошное многослойное динамическое покрытие.

Важнейшей операцией при обработке данных ДЗЗ и аэросъемки является геопривязка. Геопривязка в контексте ДЗЗ – это процесс по установлению связи пиксельных координат снимков с соответствующими им координатами на поверхности Земли [ГОСТ Р 59754–2021]. Для геопривязки снимков при ДЗЗ из космоса, как правило, используется строгая модель съемки. Однако стандартные продукты ДЗЗ из космоса (продукты уровней обработки L1 и L2) поставляются потребителю не со строгой моделью съемки, а с ее аппроксимацией – коэффициентами RPC-полиномов [5].

Обычно геопривязка выполняется в два этапа.

На первом этапе используются бортовые измерения: данные от аппаратуры спутниковой навигации (АСН), звездных датчиков, инерциальных датчиков (ИД), дальномеров, устанавливаемых на аппаратах ДЗЗ, данные функциональных дополнений (ФД) и т. д. [6–8]. Точность геопривязки на первом этапе для продуктов ДЗЗ, полученных от космических аппаратов (КА) «Канопус-В», БКА, «Ресурс-П» составляет 10–18 м в плане [9, 10].

На втором этапе для повышения точности геопривязки, устранения остаточных деформаций моделей снимков, а также для контроля точности геопривязки при дальнейшей фотограмметрической обработке снимков используются в первую очередь наземная геодезическая основа (ГО), модели рельефа и другие уже перечисленные выше данные.

В качестве наземной ГО используются пункты государственной геодезической и нивелирной сетей, точки съемочных сетей и точки полевой подготовки.

При аэрокосмических топографических съемках труднодоступной территории или недоступной для непосредственного обследования и выполнения требуемого комплекса наземных геодезических работ, возникает проблема создания наземной ГО. В результате точность фотопланов, ортомозаик, карт и другой (в том числе цифровой) информации о недоступной территории будет существенно хуже аналогичных произведений, полученных с использованием координат точек съемочной сети и полевой подготовки снимков.

Таким образом, целью исследований являются повышение точности определения координат объектов недоступной территории и обеспечение выполнения контроля точности их определения по материалам аэрокосмических топографических съемок. Для достижения цели исследований в первую очередь необходимо, основываясь на доступном на сегодняшний день уровне техники, решить следующие задачи:

– обоснование способов выполнения аэрокосмических съемок (матричных, сканерных и матрично-сканерных съемок) недоступной территории, дополняющих способы съемок с использованием бортовых навигационных систем навигации и ориентации, а также позволяющих выполнить контроль их точности;

– априорное оценивание точности определения координат объектов недоступной территории с применением разработанных способов выполнения аэрокосмических ОЭ съемок.

СПОСОБЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ ПУНКТОВ

Учеными Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского ранее был предложен способ для решения проблемы получения ГО на недоступной территории [11]. Способ [11] имеет два существенных недостатка, ограничивающих его применение. Это необходимость выполнения комплекса наземных геодезических работ по созданию ГО на доступной территории и нахождение ГО и недоступной территории в достаточной близости, обеспечивающей их одновременную видимость из точки фотографирования.

Устранить отмеченные недостатки рассмотренного выше способа [11] можно, опираясь на технические решения, реализованные в способах астронавигации по звездным датчикам [6–8] и в способе применения динамического опорного пункта в испанской мобильной картографической системе *mapKITE* [12, 13]. Кроме того, существенным недостатком способа [12] является использование в качестве носителя динамического опорного пункта автомобильного транспорта, что не позволяет реализовывать способ [12] на недоступной территории.

Предлагаемая идея получения ГО на недоступной территории состоит в использовании летательных аппаратов (ЛА) как носителей динамических опорных пунктов (мобильных марок), координаты которых определяются по данным, полученным от бортовых навигационных систем (БНС) транспорта, которые включают инерциальные датчики (ИД) и АСН, в том числе с применением ФД [13].

Первый разработанный в рамках публикуемого исследования *способ аэрокосмических оптико-электронных* (ОЭ) *топографических съемок* (АКТС) предполагает, по аналогии с системой *mapKITE* [14], в качестве ГО использовать марку, закрепленную не на автомобиле, а на летательном аппарате (число динамических опорных пунктов может быть увеличено) (рис. 1).

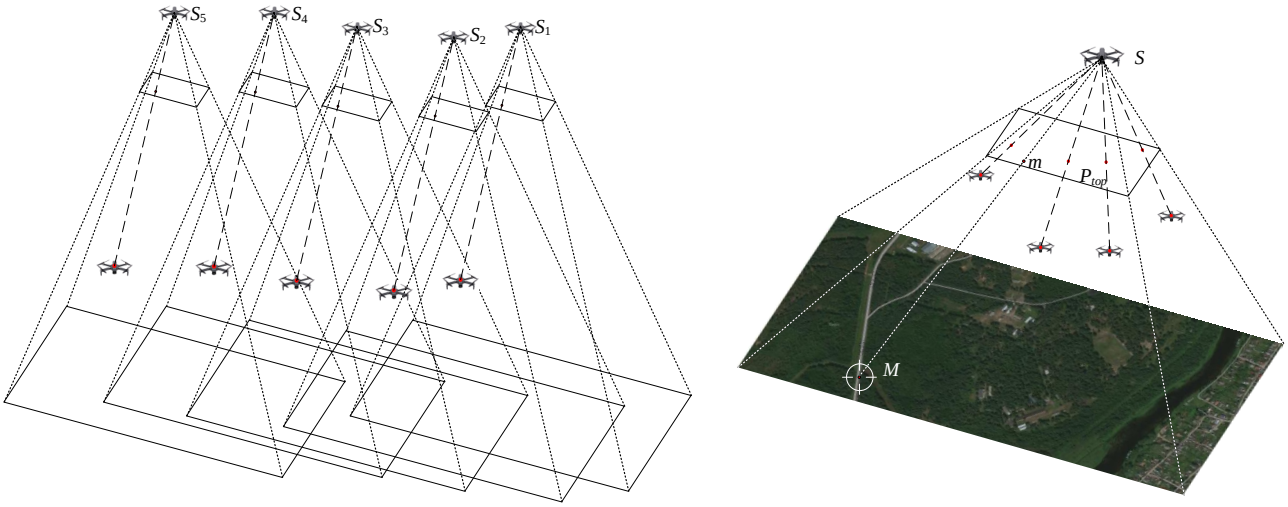


Рис. 1. Первый способ АКТС (слева: в поле зрения топографической камеры находится один ЛАМ; справа: в поле зрения топографической камеры находятся несколько ЛАМ), где P_{top} – снимок, полученный топографической камерой

Реализация первого способа АКТС включает следующие шаги:

– размещение летательных аппаратов-марок (ЛАМ) в поле зрения топографической камеры (камер), установленной на летательном аппарате ДЗЗ (ЛАДЗЗ);

– выполнение съемки (воздушного/космического фотографирования/сканирования);

– одновременное с выполнением съемки фиксирование данных от БСН ЛАМ и ЛАДЗЗ;

– определение координат местоположения ЛАМ и ЛАДЗЗ в моменты формирования ОЭ снимков по данным от БСН;

– определение координат объектов недоступной территории фотограмметрическими методами с использованием изображений ЛАМ в качестве изображений опорных точек.

Второй разработанный *способ АКТС* предполагает, что затруднено или невозможно размещение ЛАМ в поле зрения топографической камеры (камер). В этом случае, по аналогии со способами астронавигации по звездным датчикам, необходимо использовать вспомогательную камеру или камеры (рис. 2). Конструктивные углы (углы выставки) между камерами должны быть известны и могут уточняться или должны определяться по известным методикам.

Реализация второго способа АКТС включает следующие шаги:

– размещение летательных аппаратов-марок (ЛАМ) в поле зрения вспомогательной камеры (камер), установленной на летательном аппарате ДЗЗ (ЛАДЗЗ);

– выполнение съемки (воздушного/космического фотографирования/сканирования);

– одновременное с выполнением съемки недоступной территории и *ЛАМ*, фиксирование данных от БСН ЛАМ и ЛАДЗЗ;

– определение координат местоположения ЛАМ и ЛАДЗЗ в моменты формирования ОЭ снимков, по данным от БСН;

– *определение элементов внешнего ориентирования (ЭВО) камеры (камер), фотографирующей ЛАМ, по изображениям ЛАМ на ОЭ снимках*;

– *определение ЭВО камеры (камер), фотографирующей недоступную территорию, по значениям углов выставки камер и ЭВО камеры (камер), фотографирующей ЛАМ*;

– определение координат объектов недоступной территории фотограмметрическими методами с использованием *ЭВО камеры (камер), фотографирующей недоступную территорию*.

Приведем *некоторые вариации предлагаемых способов*:

1) использование одной или нескольких только топографических камер (в том числе на разных летательных аппаратах) и одного ЛАМ в их поле зрения;

2) использование только топографических камер (в том числе на разных летательных аппаратах) и нескольких ЛАМ в их поле зрения;

3) использование одной или нескольких топографических камер (в том числе на разных летательных аппаратах) и одной или нескольких вспомогательных камер для съемки ЛАМ.

Отдельно стоит отметить, что в качестве ЛАМ могут быть использованы воздушные суда, попавшие на снимки и оснащенные системами автоматического зависимого наблюдения-вещания за авиатранспортом [15]. Также при АКТС прибрежных районов в качестве динамических опорных пунктов могут быть использованы суда, попавшие на снимки и оснащенные системами идентификации морского транспорта [16, 17].

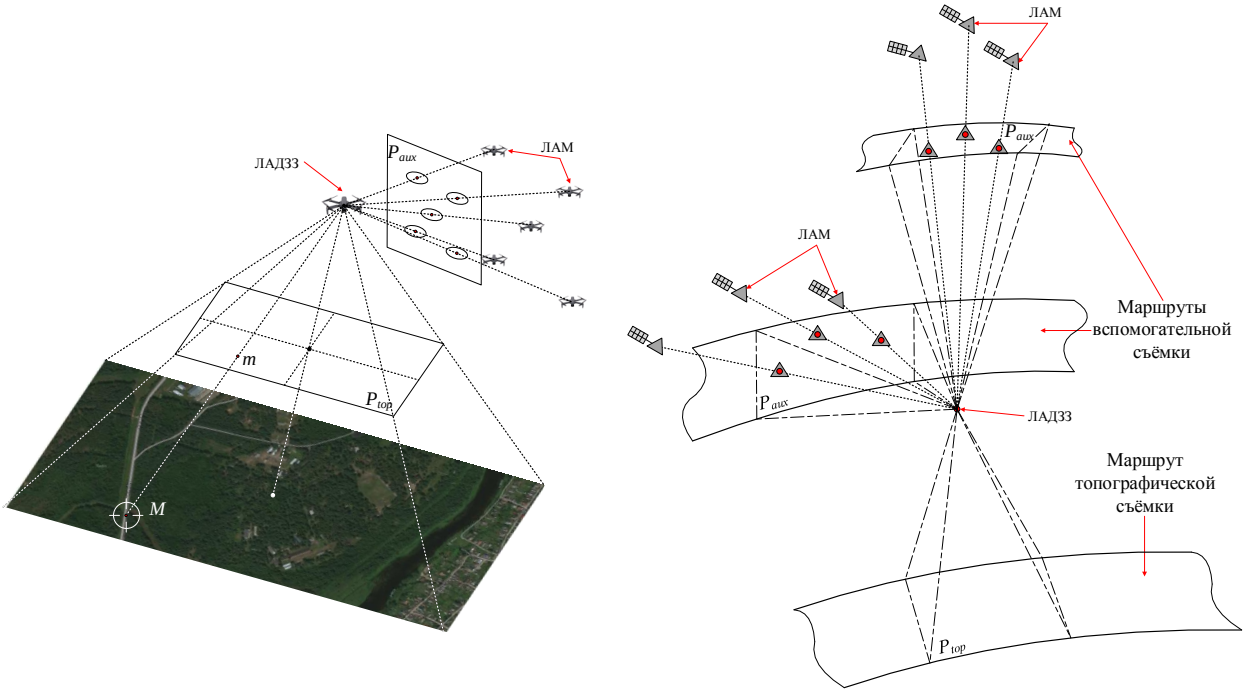


Рис. 2. Второй способ АКТС (слева: для съемки ЛАМ используется одна вспомогательная камера; справа: для съемки ЛАМ используются две вспомогательные камеры, расположенные ортогонально), где P_{aux} – снимок, полученный вспомогательной камерой

Потенциально по данным систем наблюдения, отслеживания и идентификации можно определять координаты грузов и транспорта любого типа в моменты фотографирования (сканирования) местности.

В рамках второго способа съемка ЛАМ выполняется только матричным (кадровым) аппаратом, в то время как съемка непосредственно объекта может выполняться матричным, сканерным и матрично-сканерным аппаратами.

АПРИОРНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ НЕДОСТУПНОЙ ТЕРРИТОРИИ ПО ДАННЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Априорное оценивание точности определения координат объектов недоступной территории по *стереопаре* ОЭ сканерных снимков с применением только бортовых систем навигации и ориентации. Поскольку большинство КА ДЗЗ, применяемых для картографирования, оснащены сканерной или матрично-сканерной ЦА, далее речь будет идти о сканерной ОЭ съемке.

Для априорного оценивания погрешностей определения координат точек объектов сканерной ОЭ съемки по бортовым измерениям ЭВО строк *стереопары* ОЭ снимков, при допущении, что угол крена топографической камеры $\gamma = 0°$, а угол тангажа (наклона) топографической камеры $\varepsilon_{top} \neq 0°$, доцентом В. И. Вершининым установлены аналитические зависимости [18]:

$$\sigma^2_{X,Y(M)} = \frac{1}{4}\left(\frac{\mu^2 D^2_{top}}{f^2_{top}} + \sigma^2_{X,Y(S)}\right)\left(\frac{1+\cos^2\varepsilon_{top}}{\cos^2\varepsilon_{top}}\right), \quad \sigma^2_{Z(M)} = \frac{1}{2}\left(\frac{\mu^2 D^2_{top}}{f^2_{top}} + \sigma^2_{Z(S)}\right)\frac{1}{\sin^2\varepsilon_{top}}, \qquad (1)$$

где

$$\mu^2 = \mu^2_{x,y(m)} + \mu^2_{mod} + \frac{\sigma^2_{\beta,\gamma} f^2_{top}}{\rho^2}. \qquad (2)$$

Здесь $\sigma_{X,Y(M)}$ и $\sigma_{Z(M)}$ – СКП планового положения и высот определяемых точек недоступной местности;

– СКП определения планового положения и высот центров проекций;

D_{top} – наклонная дальность от центра проекции (точки *S*, рис. 1 и 2) до определяемой точки *M* недоступной местности;

ε_{top} – угол наклона (тангажа) топографической камеры;

$\mu_{x,y(m)}$ – СКП непосредственно измерения координат на ОЭ снимке;

μ_{mod} – СКП, вносимая несоответствием математической модели ОЭ снимка реальной картине его построения;

$\sigma_{\beta,\gamma}$ – СКП определения углов наклона топографической камеры (сканера);

f_{top} – фокусное расстояние топографической камеры (сканера);

ρ – число секунд в радиане.

Допустим, что СКП $\mu_{x,y(m)} = \mu_{x(m)}, = \mu_{y(m)}$, $\mu_{p(m)} \approx \mu_{q(m)}$ измерения координат, продольного и поперечного параллаксов на топографических ОЭ снимках будут обусловлены только размером $l_{x,y}$ пикселей съемочных камер и будут носить случайный характер.

Известна формула [19] СКП определения координат на цифровом снимке, которая может быть адаптирована для вычисления СКП определения параллаксов

$$\mu_{x,y(m)} = \mu_{x(m)} = \mu_{y(m)} = \frac{\mu_{p(m)}}{\sqrt{2}} = \frac{\mu_{q(m)}}{\sqrt{2}} = \frac{l_{x,y}}{2\sqrt{3}}, \quad (3)$$

Для зависимостей (1)–(3) и стереопары ОЭ сканерных снимков, при: $\gamma = 0°$; размере пикселя $l_{x,y} = 6 \cdot 10^{-6}$ м ($\mu_{x,y(m)} = 1{,}73 \cdot 10^{-6}$ м); $\varepsilon_{top} \approx 31°$; $D_{top} = H_{top}/\cos(\varepsilon) = 5{,}83 \cdot 10^5$ м ($H_{top} = 5 \cdot 10^5$ м – высота сканирования); $f_{top} = 4$ м; $\mu_{mod} = 1{,}5\ l_{x,y;} \cdot f_{top}/D_{top} \approx 6 \cdot 10^{-6}$ м; $\sigma_{Z(S)}$=1,5 м; $\sigma_{X,Y(S)} = \sigma_{X(S)} = \sigma_{Y(S)} = 1$ м; σ_β = 1-4″, ожидаемые СКП $\sigma_{X(M)} \approx \sigma_{Y(M)}$ определения плановых координат объектов недоступной территории составят 1,5–4,7 м, а СКП $\sigma_{Z(M)}$ высот 3–8,3 м. Эта зависимость представлена на рис. 3.

Из рассмотрения рис. 3 понятно, что СКП определения плановых координат и высот по данным бортовых измерений находятся в зависимости, близкой к прямо пропорциональной от СКП определения углов наклона ЦА. На одну угловую секунду СКП определения углов наклона ЦА приходится примерно от 1,5 до 1,2 м СКП определения плановых координат объектов местности и 2–2,1 м СКП определения высот.

Следует отметить, что в зависимостях (1)–(3) не учитывается влияние погрешностей определения угла поворота ЦА, элементов внутреннего ориентирования ЦА, влияние атмосферы и других факторов.

Значит, на рис. 3 представлены ожидаемые оценки СКП определения координат объектов недоступной территории (ожидаемые СКП определения координат объектов местности будут не менее представленных на рис. 3).

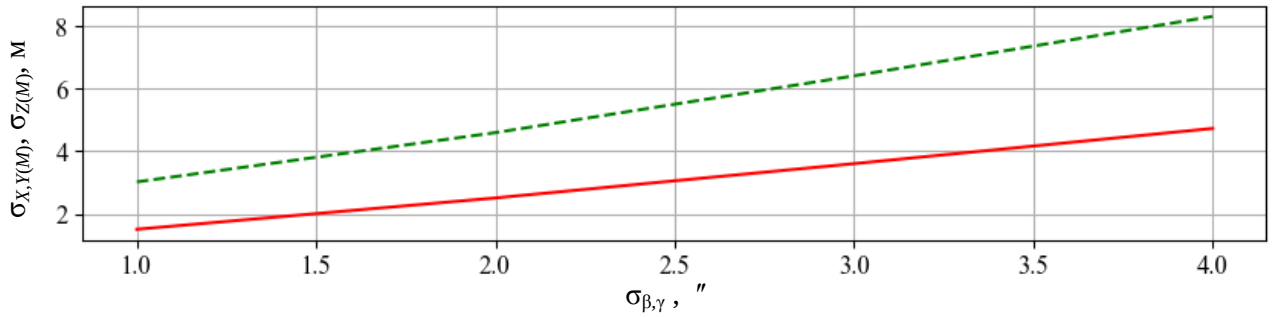


Рис. 3. Зависимость СКП определения координат объектов недоступной территории от точности определения углов наклона ЦА ($\sigma_{X,Y(M)}$ – непрерывная линия, $\sigma_{Z(M)}$ – штриховая линия)

Априорное оценивание точности определения координат объектов недоступной территории по *стереопаре* ОЭ сканерных снимков с применением динамических опорных пунктов. Поскольку геопривязка ОЭ снимков в предлагаемых способах АКТС выполняется по ЛАМ, для использования в априорных вычислениях выражений (1) и (2) необходимо получить формулу для вычисления СКП $\sigma_{\beta,\gamma}$ определения углов наклона топографической камеры (сканера) по данным о положении ЛАМ. Для упрощения этой задачи рассмотрим случай съемки АКТС с применением ЛАМ, который будет общим для обоих способов: ЛАМ находятся в плоскости основания вспомогательной съемки, параллельной плоскости основания топографической съемки; главный луч вспомогательной камеры близок к перпендикуляру к плоскостям оснований топографической и вспомогательной съемок.

Точка *M* принадлежит объекту съемки. Точка *J* является опорной точкой, носителем которой служит динамический опорный пункт (мобильная марка *J*). Пусть точки *M* и *J* принадлежат проектирующему лучу *SM* и *J* находится между точками *S* и *M* (рис. 4).

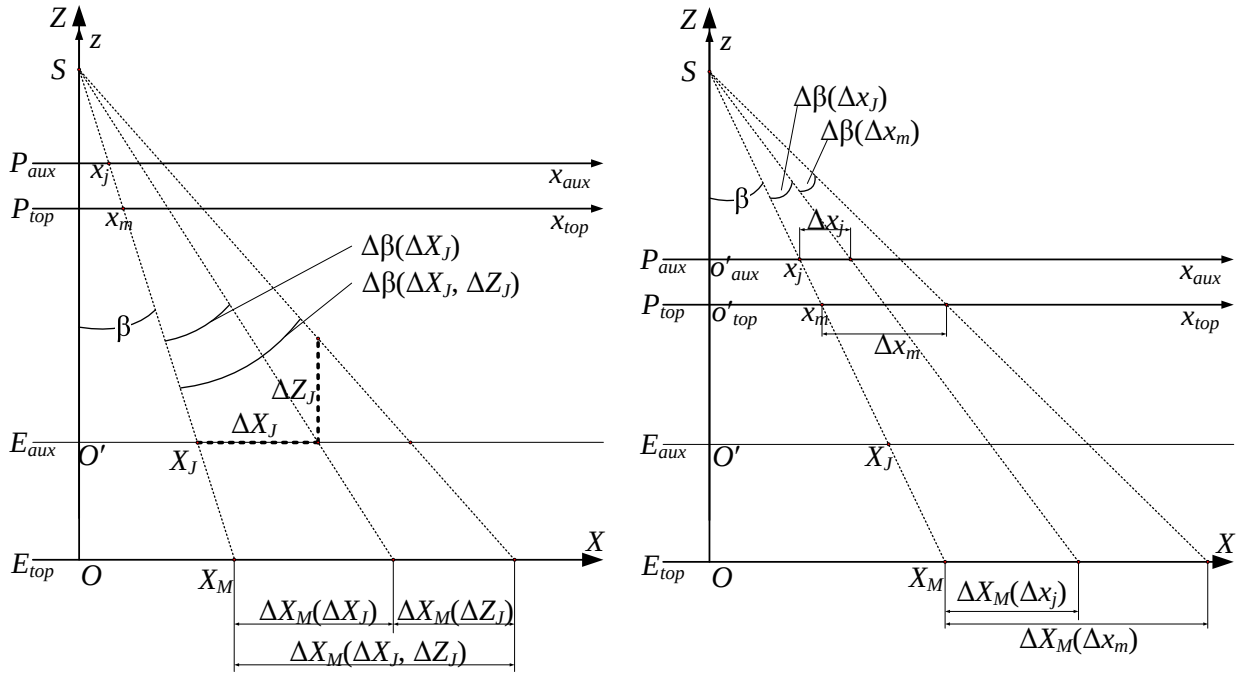


Рис. 4. Схема АКТС, общая для разработанных способов (слева: связь погрешностей определения координат ЛАМ с погрешностями определения углов наклона ЦА, справа: связь погрешностей измерения координат на вспомогательном и топографическом снимках с погрешностями определения углов наклона ЦА)

Точки *m* и *j* – центральные проекции точек *M* и *J* на топографический и вспомогательный снимки. P_{top}, P_{aux} – плоскости топографического и вспомогательного снимков; E_{top} – плоскость основания при топографической съемке (горизонтальная плоскость, проходящая через какую-либо точку местности); E_{aux} – плоскость основания при вспомогательной съемке (горизонтальная плоскость, проходящая через какой-либо ЛАМ в момент фотографирования);

В описанном случае съемки треугольники OSX_M, OSX_J, $o'Sx_j$, $o'Sx_m$ подобны.

Значит, для априорных расчетов будут справедливы выражения:

$$X_J = -\frac{Z_J}{f_{aux}} x_j, \quad Y_J = -\frac{Z_J}{f_{aux}} y_j, \quad \beta_{aux} = -\frac{x_j}{f_{aux}}\rho, \quad \gamma_{aux} = -\frac{y_j}{f_{aux}}\rho,$$
$$\Delta\beta_{aux} = -\frac{\Delta x_j}{f_{aux}}\rho, \quad \Delta\gamma_{aux} = -\frac{\Delta y_j}{f_{aux}}\rho, \tag{4}$$

где $\Delta\beta_{aux}$, $\Delta\gamma_{aux}$ – погрешности определения углов наклона ЦА.

При определении координат центров проекций с применением АСН, для определения угловых ЭВО вспомогательной камеры (по одному вспомогательному снимку) достаточно, чтобы в поле зрения вспомогательной камеры находились два динамических опорных пункта (один опорный пункт позволяет составить два уравнения поправок).

Указанный факт учитывается при переходе от случайных, независимых погрешностей $\Delta\beta_{aux}$, $\Delta\gamma_{aux}$, Δx_j, Δy_j (4) к СКП (5) применением теоремы «о среднем соотношении весов измеренных величин до и после уравнивания» [20].

В результате получим выражения:

$$\mu^2_{\beta,\gamma} = \frac{\rho^2}{f^2_{aux}}\mu^2_{x,y(j)}; \quad \sigma^2_{\beta,\gamma} = \frac{N_{II}}{M_{II}}\mu^2_{\beta,\gamma}, \tag{5}$$

где $\mu_{x,y(j)}$ – СКП непосредственно измерения соответствующих координат на вспомогательных ОЭ снимках, $\mu_{x,y(j)} = \mu_{x(j)}, = \mu_{y(j)}$;
$N_{II} = 3$ – число определяемых величин;
M_{II} – число уравнений поправок, $M_{II} = 2n_J$;
n_J – число ЛАМ в поле зрения вспомогательной камеры, $2 \ldots n_j \ldots n_J$.

Формулы (5) позволяют получить априорную количественную оценку влияния погрешностей $\mu_{x,y(j)}$ непосредственного измерения координат на вспомогательном ОЭ снимке на точность вычисления угловой ориентации вспомогательной камеры.

Для априорного оценивания СКП $\sigma_{\beta,\gamma}$ определения углов наклона вспомогательной камеры в угловых секундах по динамическим опорным пунктам за основу принята формула [18]

$$\sigma^2_{\beta,\gamma} = \frac{\rho^2}{D^2_{aux}}\left[\sigma^2_{X,Y(J)}\left(1+\cos^2\varepsilon_{aux}\right)+\sigma^2_{Z(J)}\sin^2\varepsilon_{aux}\right], \quad (6)$$

где $\sigma_{X,Y(J)}, \sigma_{Z(J)}$ – СКП определения соответствующих плановых координат и высот динамических опорных пунктов;
f_{aux} – фокусное расстояние вспомогательной фотокамеры;
D_{aux} – расстояние от центра проекции вспомогательной камеры до плоскости основания вспомогательной съемки динамических опорных пунктов J;
ε_{aux} – угол между главным лучом вспомогательной камеры и проектирующим лучом, проходящим через динамический опорный пункт n_j, при этом $\varepsilon_{aux} = \mathrm{arctg}(x_j/f_{aux})$.

Если число используемых динамических опорных пунктов больше двух, то, в соответствии с теоремой о среднем соотношении весов измеренных величин до и после уравнивания, СКП $\sigma_{\beta,\gamma}$ определения углов наклона вспомогательной камеры (4) следует уменьшить до

$$\sigma^2_{\beta,\gamma} = \frac{N_{II}}{M_{II}}\frac{\rho^2}{D^2_{aux}}\left[\mu^2_{X,Y(J)}\left(1+\cos^2\varepsilon_{aux}\right)+\mu^2_{Z(J)}\sin^2\varepsilon_{aux}\right]. \quad (7)$$

При вычислении СКП $\sigma_{\beta,\gamma}$ определения углов наклона вспомогательной камеры, также следует учесть влияние погрешности измерения координат на вспомогательных снимках (5). Для рассматриваемого случая выражение (6) с учетом (5) примет вид

$$\sigma^2_{\beta,\gamma} = \frac{N_{II}}{M_{II}}\frac{\rho^2}{D^2_{aux}}\left[\mu^2_{X,Y(J)}\left(1+\cos^2\varepsilon_{aux}\right)+\mu^2_{Z(J)}\sin^2\varepsilon_{aux}\right]+\frac{N_{II}}{M_{II}}\frac{\rho^2}{f^2_{aux}}\mu^2_{x,y(j)}, \quad (8)$$

где $\mu_{x,y(j)}$ – СКП непосредственно измерения координат на вспомогательном снимке.

Пусть при реализации разработанных способов АКТС можно пренебречь методическими погрешностями пересчета угловых ЭВО вспомогательной камеры в угловые ЭВО топографической камеры. Тогда для априорного оценивания погрешностей определения координат точек объектов стереосъемки недоступной территории с применением разработанных способов могут быть использованы зависимости (1), (2) и (8).

Для условий, описанных выше, используя выражения (1), (2) и (8), были рассчитаны априорные оценки точности определения координат объектов недоступной территории по данным аэрокосмической сканерной съемки с применением динамических опорных пунктов (рис. 5 и 6).

Из анализа рис. 5 можно сделать вывод, что увеличение числа ЛАМ n_J более 4 шт. и увеличение расстояний между точкой фотографирования и плоскостью основания вспомогательной съемки более $0{,}4H_{top}$ не приводят к существенному росту точности определения углов наклона целевой аппаратуры.

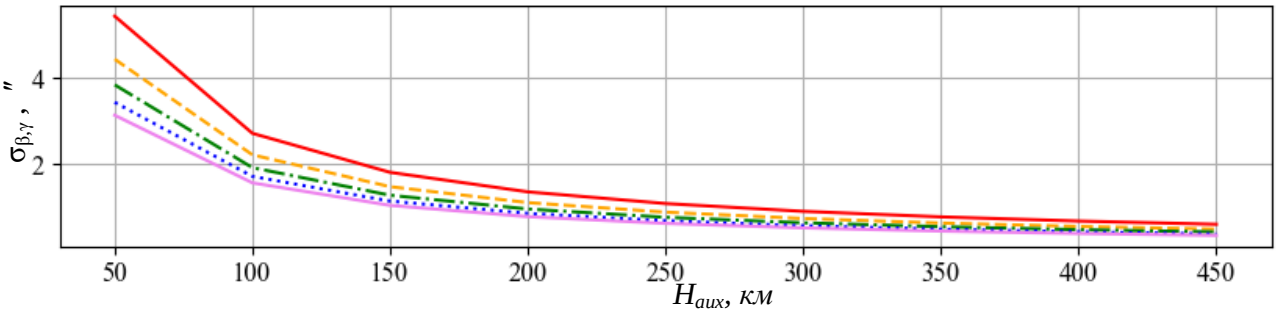


Рис. 5. Ожидаемые значения СКП определения углов наклона ЦА с применением разработанных способов АТКС, сверху вниз: от двух до шести (включительно) динамических опорных пунктах, находящихся в местах стандартного расположения

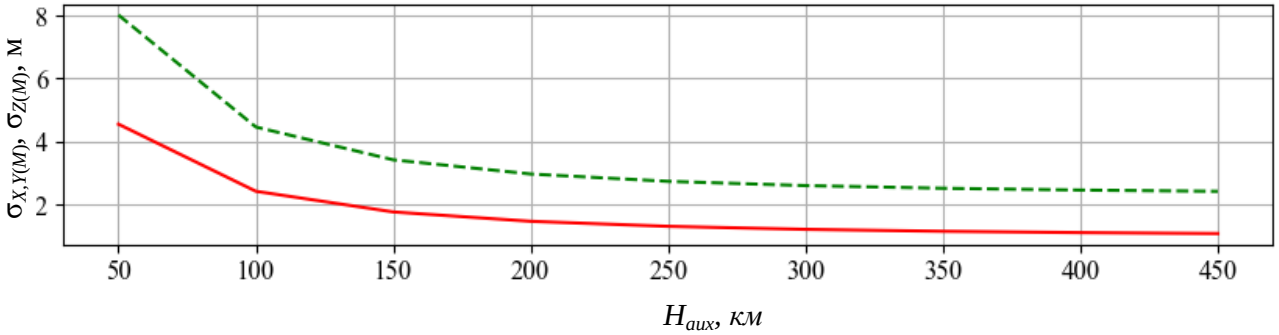


Рис. 6. Ожидаемые значения СКП определения координат объектов недоступной территории с применением разработанных способов АТКС с четырьмя динамическими опорными пунктами ($\sigma_{X,Y(M)}$ – непрерывная линия, $\sigma_{Z(M)}$ – штриховая линия)

Результаты априорных вычислений показывают, что предлагаемые способы (рис. 6) позволяют достигать СКП определения координат недоступной территории около 1,5 м, используя во время производства АТКС четыре динамических опорных пункта на расстояниях порядка $H_{aux} = 0{,}4H_{top}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты с применением разработанного математического аппарата показали, что предлагаемые способы позволяют определять координаты объектов недоступной для полевых геодезических работ территории по космическим сканерным снимкам с точностью, не уступающей точности способов, при применении которых используются только данные бортовых измерений.

Кроме того, при матрично-сканерной, матричной (кадровой) топографической съемке и размещении ЛАМ в поле зрения топографических камер, появляется возможность выполнения контроля точности геопривязки ОЭ снимков, а значит, появляется возможность выполнения контроля точности информации о недоступной территории.

Отдельно необходимо исследовать потенциал совместного применения разработанных способов с технологиями отслеживания транспорта и грузоперевозок, например, с технологиями автоматического зависимого наблюдения-вещания за авиатранспортом [15] и технологиями идентификации морского транспорта [16, 17], поскольку данные о положении, скоро-

сти и направлении движения воздушных и морских судов находятся, в том числе, в открытом доступе (https://www.flightradar24.com; https://www.vesselfinder.com/ru).

Дальнейшее оценивание точности и проверка разработанных способов АКТС с применением динамических опорных точек предполагаются с применением аналитических моделей местности (макетных снимков).

Список использованных источников

1. Итоги российской космонавтики в 2024 году : [сайт]. – URL: https://www.roscosmos.ru/41108/ (дата обращения: дата обращения: 23.07.2025).

2. Автоматическая обработка данных космической съемки в наземном сегменте отечественной многоспутниковой группировки КА ДЗЗ / Д. И. Федоткин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 9–30.

3. Анализ точности ортомозаики, созданной в автоматическом режиме новым ПК из космических снимков высокого разрешения / Д. И. Федоткин [и др.] // Геопрофи. – 2024. – № 2. – С. 20–24.

4. Результаты автоматического построения бесшовных паншарп-ортомозаичных покрытий на 12 территориальных субъектов РФ по данным КА Канопус-В / Д. И. Федоткин [и др.] // IV Совместная международная научно-техническая конференция «ЦИФРОВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ: космические и пространственные данные, технологии обработки». 16–19 сентября, Минск, Республика Беларусь. – 2024. – С. 30–37.

5. *Пошехонов В. И., Кузнецов А. Е., Егин М. М.* Оценка точности аппроксимации строгой модели космической съемки рациональными полиномами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 83. – С. 95–101.

6. Звездные датчики ориентации в астроинерциальных системах летательных аппаратов / Бессонов Р.В. [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 6. – С. 9–20.

7. Институт РАН завершил разработку самого высокоточного прибора ориентации спутников в мире (19 апреля 2022) // ТАСС : информ. агентство России : сайт. – URL: https://tass.ru/kosmos/14407319 (дата обращения: 23.07.2025).

8. *Заварзин В. И., Ли А. В.* Методика определения элементов внешнего ориентирования для оперативной координатной привязки снимков оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Наука и инновации : инженерн. журн. – 2013. – № 9(21). – URL: http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/908.html (дата обращения: 23.07.2025).

9. *Финошин Д. Г., Кравцова Е. В., Лобанов В. К.* Анализ точностных характеристик и реализация технологии фотограмметрической обработки снимков, полученных с КА «Канопус-В» и БКА. – URL: https://innoter.com/articles/analiz-tochnostnykh-kharakteristik-i-realizatsiya-tekhnologii-fotogrammetricheskoy-obrabotki-snimkov/ (дата обращения: 26.02.2026).

10. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми с космической системы «Ресурс-П» Версия 1, 2023. – URL: https://www.roscosmos.ru/media/files/2024/rukovodstvo.pol.zovatela.dannimi.dzz.polucaemimi.s.ks.resurs-p.pdf (дата обращения: 26.02.2026).

11. *Нечипас Ю. П., Левадный Ю. В., Телеш В. А.* Способ фотограмметрического определения координат точек местности на недоступной территории // Навигация и гидрография. – 2018. – № 53. – С. 34–39.

12. *Чибуничев А. Г.* Фотограмметрия : учебник для вузов – М. : Изд-во МИИГАиК, 2022. – 328 с.

13. Пат. № 2840058 C1 Российская Федерация, МПК G01C 11/06, B64C 39/02. Способ определения координат объекта по стереопаре его снимков и по снимку летательных аппара-

тов / И. В. Чернов, Б. Н. Корнеев; заявитель Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации. – № 2024121182; заявл. 24.07.2024 : опубл. 16.05.2025, Бюл. № 14. – 9 с.

14. mapKITE: A new paradigm for simultaneous aerial and terrestrial geodata acquisition and mapping / P. Molina [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016. Prague, Czech Republic/ – 2016. – Vol. XLI-B1. – P. 957–962.

15. Геоскан подтвердил возможность приема сигналов АЗН-В на кубсаты от воздушных судов на малых и больших высотах (23 октября 2025). – URL: https://www.geoscan.ru/ru/press-releases/geoskan-podtverdil-vozmozhnost-priema-signalov-azn-v-na-kubsaty-ot-vozdushnykh-sudov-na-malykh (дата обращения: 23.07.2025).

16. Кубсат Геоскана начал отслеживать морской трафик (20 октября 2025). – URL: https://www.geoscan.ru/ru/press-releases/kubsat-geoskana-nachal-otslezhivat-morskoy-trafik (дата обращения: 23.07.2025).

17. Спутники Геоскана продолжают тестировать технологии на орбите (14 ноября 2025)/ – URL: https://www.geoscan.ru/ru/blog/sputniki-geoskana-prodolzhayut-testirovat-tekhnologii-na-orbite (дата обращения: 23.07.2025).

18. *Вершинин В. И.* Априорная оценка точности координатных определений по космическим снимкам : моногр. – М. : Типография «Новости», 2011. – 219 с.

19. *Колесников В. Н., Козлов О. И.* Точность измерения координат точек космических изображений КА ДЗЗ Ресурс-П при калибровке съемочной системы // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 529–533.

20. *Лысенко Ф. Ф.* Построение, уравнивание и оценка точности блочных фотограмметрических сетей : дис. … д-ра техн. наук. – М., 1971. – 230 с.

Д. В. Андрушкевич,
кандидат технических наук

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НОВОСТНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЦЕЛЕВУЮ АУДИТОРИЮ

В статье представлена методика оценивания степени воздействия новостного контента на целевую аудиторию. Методика основана на оценивании эмоциональной реакции пользователей на новостные сообщения с применением алгоритмов машинного обучения для классификации тональности текста и теории графов для визуализации и анализа социальных взаимодействий. Ключевым элементом методики является интеграция алгоритма стемминга Портера для предобработки текстовых данных и наивного байесовского классификатора для определения эмоциональной окраски. Разработанный программный комплекс демонстрирует значительное превосходство по скорости и точности в сравнении с традиционными методами анализа, что подтверждает практическую применимость и адекватность предложенного подхода.

Ключевые слова: целевая аудитория, степень воздействия, анализ тональности, машинное обучение, теория графов, социальные сети, стемминг Портера, наивный байесовский классификатор, кластерный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Современная информационная среда характеризуется высокоскоростным распространением значительных объемов данных, что оказывает существенное влияние на формирование мнений и поведения целевых аудиторий. В условиях насыщенного информационного пространства становится критически важным не просто фиксировать факт потребления контента, но и оценивать степень его воздействия, т. е. меру, в которой новость вызывает эмоциональный отклик и стимулирует социальные взаимодействия (комментарии, репосты, дискуссии). В данной работе под целевой аудиторией понимается группа пользователей, оставивших следы взаимодействия с конкретной новостью (комментарии, реакции, репосты), чье поведение и эмоциональная реакция подлежат анализу.

В настоящее время оперативный анализ реакции целевой аудитории на новостные потоки приобретает критическую важность для принятия управленческих и медиарешений. В этой связи актуализируется задача разработки автоматизированных систем анализа новостного контента и моделирования социальных взаимодействий.

Рост популярности социальных сетей способствует увеличению числа новостных ресурсов, предоставляющих пользователям сжатые обзоры актуальных событий. Эмоциональный отклик, возникающий у пользователей при потреблении данного контента, является ключевым индикатором их восприятия информации [1]. Следовательно, автоматизированное определение эмоциональной окраски текста (позитивной, негативной, нейтральной) представляет собой важнейший компонент анализа воздействия на целевую аудиторию.

Целью настоящего исследования является разработка методики автоматизированного оценивания степени воздействия новостного контента, сочетающего достоинства технологий машинного обучения для классификации тональности и теории графов для анализа структур социальных взаимодействий.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Проведенный сравнительный анализ традиционных и современных методов оценивания воздействия медиаконтента на общественное мнение выявил их сильные и слабые стороны (табл. 1). К традиционным методам относятся социологические опросы и эконометрический

анализ, которые, обеспечивая глубину понимания, требуют значительных временных и ресурсных затрат, а также характеризуются ограниченностью объема и репрезентативностью выборки [2]. Современные подходы, такие как анализ социальных сетей, контент-анализ с применением нейронных сетей и методы машинного обучения, позволяют работать с большими массивами данных в режиме, близком к реальному времени, но сталкиваются с проблемами доступа к данным, сложностью настройки алгоритмов и с ошибками интерпретации [3, 4].

Предлагаемая методика призвана интегрировать преимущества рассмотренных подходов (оперативность, масштабируемость и объективность), минимизируя присущие им недостатки за счет строгой формализации процесса и применения эффективных алгоритмов предобработки данных.

Таблица 1

Сравнение методов анализа общественного мнения

№ п/п	Название метода	Описание	Преимущества	Недостатки
1	Социологические опросы	Опросы и интервью для выявления восприятия новостей	Глубина анализа, возможность уточнения	Высокие затраты, ограниченная выборка, субъективность
2	Анализ соцсетей	Анализ лайков, комментариев, репостов	Большие объемы данных, оперативность	Проблемы с доступом к данным, сложность обработки
3	Контент-анализ (NLP)	Автоматический анализ тональности текстов	Автоматизация, масштабируемость	Ошибки классификации из-за контекста
4	Эконометрические методы	Выявление связей через анализ временных рядов	Выявление скрытых закономерностей	Сложность моделей, неоднозначность причинно-следственных связей
5	Машинное обучение	Применение моделей классификации и регрессии	Высокая точность, адаптивность	Требует больших данных, сложность интерпретации

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ

Разработанная методика включает пять последовательных этапов:
1) обработку входных данных;
2) парсинг интернет-ресурса;
3) классификацию эмоциональной окраски текста;
4) построение социального графа;
5) визуализацию результатов анализа.

Этап 1. Обработка входных данных. На данном этапе выполняется валидация предоставленного URL-адреса новостного ресурса. Процедура включает синтаксическую проверку на соответствие стандарту RFC и семантическую проверку доступности ресурса путем отправки HTTP-запроса. В случае некорректности или недоступности ссылки обработка прекращается.

Этап 2. Парсинг интернет-ресурса. С целевой страницы осуществляется сбор структурированных данных: текст новостного поста, количество реакций (лайки, дизлайки), комментарии, просмотры, репосты, а также открытые данные пользователей, оставивших комментарии. Требования к парсингу будут следующие:

- поддержка статических и динамических страниц;
- извлечение только публично доступных данных в соответствии с этическими нормами;

– сохранение иерархической структуры комментариев для последующего построения графа взаимодействий;

– ограничение частоты запросов во избежание блокировок.

Этап 3. Классификация эмоциональной окраски текста. Для повышения качества классификации текст предварительно обрабатывается с использованием алгоритма стеммера Портера, который редуцирует слова к их базовой форме (стемме) путем отсечения аффиксов [5]. Это позволяет снизить размерность признакового пространства. Алгоритм включает шаги отсечения формообразующих и словообразующих суффиксов, а также пост-обработки.

Для непосредственной классификации применяется наивный байесовский классификатор. Математическая модель основана на вычислении апостериорной вероятности принадлежности текста d, представленного множеством стемм $\{S\} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, к одному из классов эмоциональной окраски $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$:

$$P(c_i|d) \sim P(c_i) \prod_{j=1}^{n} P(s_j|c_i),$$

где $P(c_i)$ – априорная вероятность класса,

$P(s_j|c_i)$ – вероятность встретить стемму s_j в классе c_i.

Окончательное решение принимается по правилу максимума апостериорной вероятности.

Этап 4. Построение социального графа. Для анализа взаимодействий между пользователями строится ориентированный взвешенный граф $G = (V, E, W)$, где V – множество вершин (пользователи), E – множество ребер (факты взаимодействия, например, ответы в комментариях), W – веса ребер (интенсивность взаимодействий).

Уровень сплоченности сообщества вокруг новости оценивается через средневзвешенный коэффициент кластеризации для вершин графа [6]:

$$C_v = \frac{\sum_{a,b \in N_v} W_{a,b}}{\binom{|N_v|}{2} \max(w)},$$

где N_v – множество соседей вершины v;

$W_{a,b}$ – вес ребра между соседями a и b;

$\max(w)$ – максимальный вес ребра в графе.

На основе модального значения коэффициента кластеризации $Mode(C_v)$ по всем вершинам графа взаимодействие пользователей классифицируется по трем уровням (табл. 2).

Таблица 2

Критерии оценки уровня взаимодействия пользователей

Уровень взаимодействия	Решающее правило
Низкий	$Mode(C_v) < 0{,}33$
Умеренный	$0{,}33 < Mode(C_v) < 0{,}66$
Высокий	$Mode(C_v) > 0{,}66$

Этап 5. Визуализация результатов. Заключительный этап работы системы предназначен для наглядного представления результатов анализа. Пользователю предоставляются следующие интерактивные диаграммы и графы:

– *анализ тональности*: определение эмоциональной окраски новости;

– *структурный анализ сообщества*: визуализация социального графа с выделенными кластерами, показывающими группы активного взаимодействия.

Ниже приведены примеры работы системы, демонстрирующие результаты анализа на различных этапах (рис. 1–4).

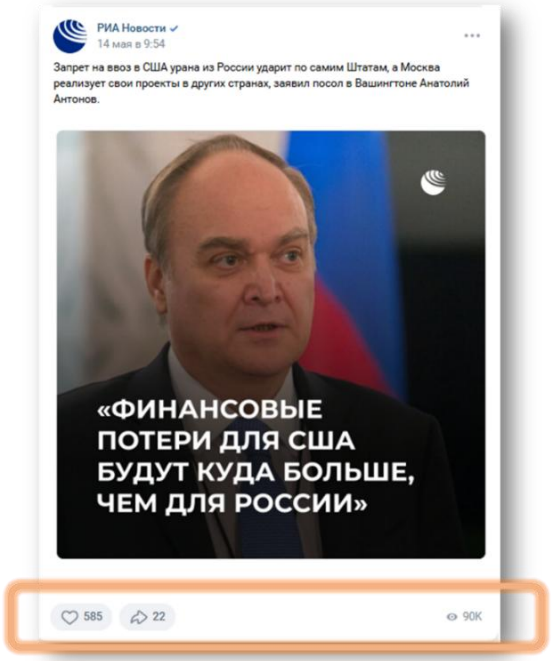


Рис. 1. Исследуемые данные

Результаты анализа данных

- Ссылка на новостной сайт: https://vk.com/bookmarks?is_from_snackbar=1&type=post
- Текст поста: **"Запрет на ввоз в США урана из России ударит по самим Штатам, а Москва реализует свои проекты в других странах, заявил посол в Вашингтоне Анатолий Антонов."**
- Количество просмотров: **4к**
- Количество лайков: **798**
- Количество комментариев: **237**
- Количество репостов: **139**

Эмоциональная окраска текста: умеренная

Оценка взаимодействия пользователей: умеренная

Рис. 2. Результаты анализа данных, полученных с помощью веб-парсинга

Имя	Лайки	Комментарии	Репосты
Анна	Да	5	Нет
Борис	Нет	2	Да
Виктория	Да	3	Нет
Глеб	Да	8	Да
Дарья	Нет	1	Нет

Рис. 3. Формирование отчета по пользователям

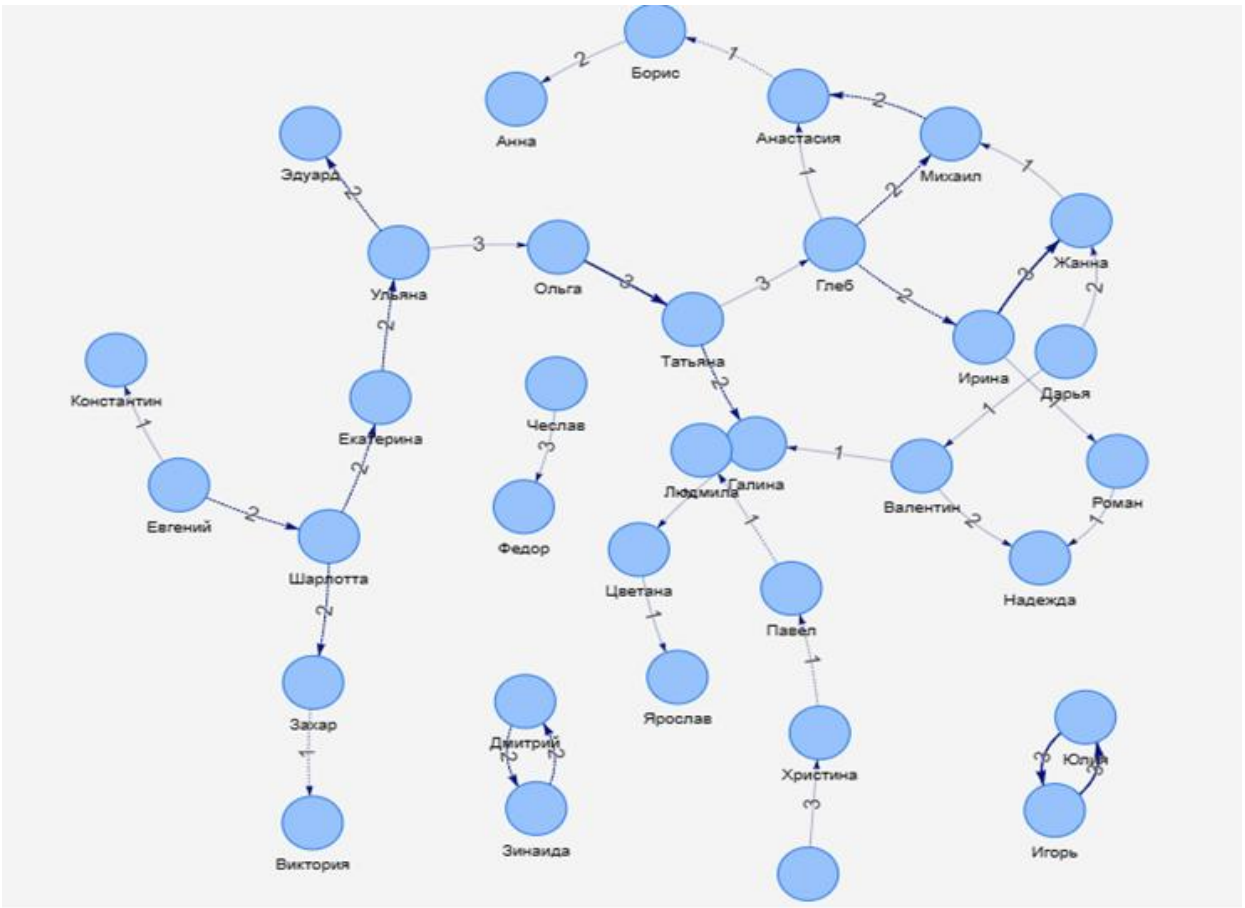


Рис. 4. Граф взаимодействия пользователей

Для формализации и визуализации процесса «анализ степени воздействия новостного контента на целевую аудиторию», включая используемые ресурсы, регламентирующие документы, инструментарий, ожидаемые результаты и связи между этапами, была применена нотация функционального моделирования IDEF0 – это стандартизованный метод описания сложных систем, позволяющий структурированно представить функции и их взаимосвязи [8]. Полученная модель (рис. 5) отражает целостную структуру методики и обеспечивает ее воспроизводимость.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ

Для апробации методики был разработан программный комплекс (ПК) с клиент-серверной архитектурой (рис. 6).

Клиентская часть реализована на React.js и включает модули ввода данных и визуализации. Серверная часть построена на Express.js и содержит следующие модули:

– *парсинг данных*: использует библиотеку Cheerio.js для извлечения контента и метрик;

– *машинное обучение*: интегрирует реализацию наивного байесовского классификатора и стеммера Портера;

– *построение графов:* генерирует социальный граф и вычисляет метрики кластеризации.

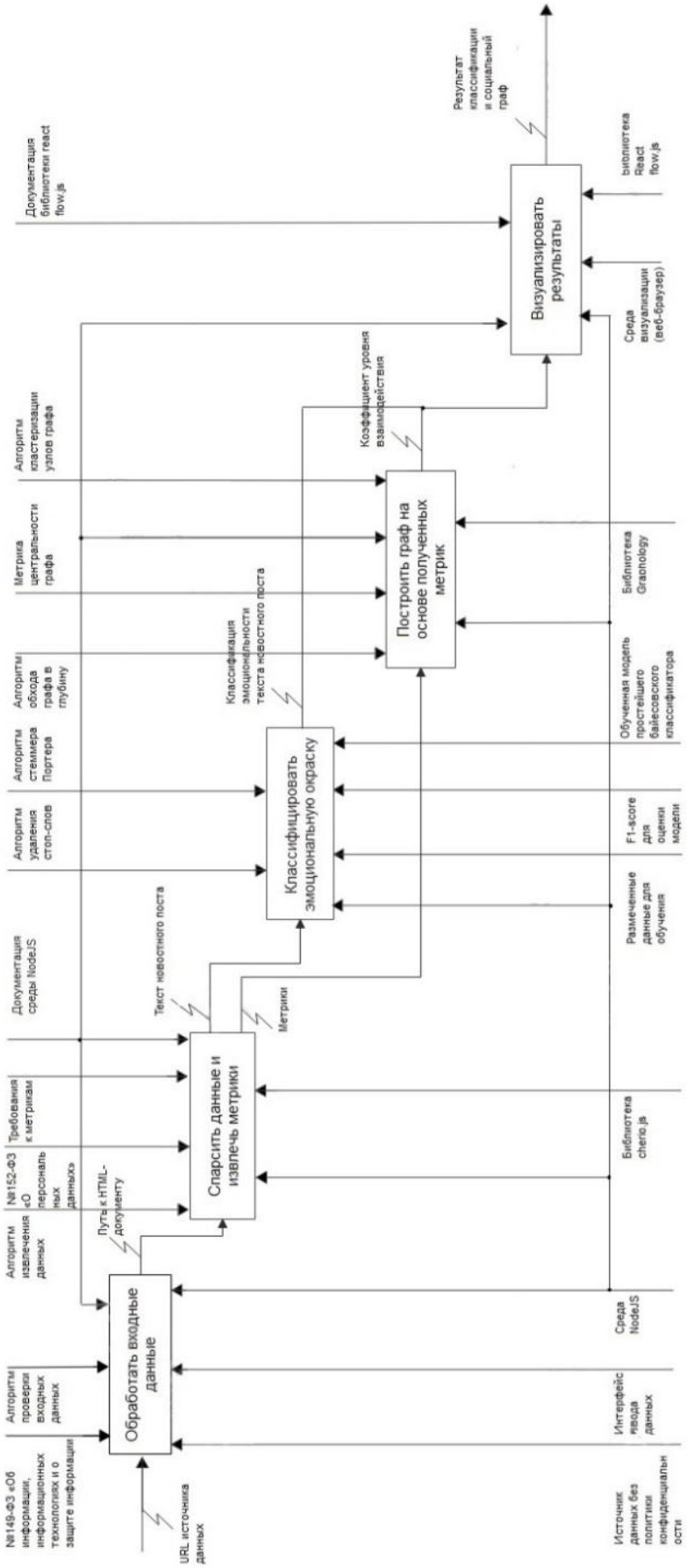


Рис. 5. Модель процесса «анализ степени воздействия новостного контента на целевую аудиторию» в нотации IDEF0



Рис. 6. Архитектурная схема построения ПК

Экспериментальные исследования показали значительное преимущество автоматизированного анализа по сравнению с ручными методами:

- скорость сбора данных увеличена в 260 раз (3 с против 780 с);
- точность классификации тональности повышена на 7,7% (0,947 против 0,87);
- время анализа взаимодействий сокращено в 60 раз (121,5 с против 7200 с).

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность разработанного программного комплекса. Его практическая значимость заключается в возможности оперативного анализа реакции конкретной аудитории, взаимодействующей с отдельным новостным материалом, что особенно востребовано в условиях динамичной информационной среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика автоматизированного анализа степени воздействия новостного контента на целевую аудиторию, основанная на синтезе методов машинного обучения и теории графов. В отличие от универсальных подходов к оценке воздействия на «общественное мнение», предложенный подход фокусируется на целевой аудитории – на конкретной группе пользователей, взаимодействующих с контентом, что обеспечивает большую точность и релевантность анализа.

Сравнение с традиционными и современными подходами к анализу медиавоздействия подтвердило преимущество предложенной методики в оценке влияния на целевую аудиторию – по скорости обработки, точности классификации и способности масштабироваться на большие объемы данных. Разработанный инструмент представляет ценность для задач медиамониторинга, требующих оперативного анализа больших объемов неструктурированных текстовых данных в контексте конкретной аудитории.

Список использованных источников

1. *Стернин И. А., Шестернина А. М.* Маркеры фейка в медиатекстах : рабочие материалы. – Воронеж : ООО «РИТМ», 2020. – 34 с.

2. Метод опорных векторов (SVM): теория и практика применения. – URL: https://habr.com/ru/companies/ods/articles/484148/ (дата обращения: 17.02.2025).

3. Рекуррентные нейронные сети (RNN) с Keras: основы и реализация. – URL: https://habr.com/ru/articles/487808/ (дата обращения: 13.02.2025).

4. Наивный байесовский классификатор: принципы работы и применение. – URL: https://proglib.io/p/izuchaem-naivnyy-bayesovskiy-algoritm-klassifikacii-dlya-mashinnogo-obucheniya-2021-11-12 (дата обращения: 19.02.202).

5. Обработка естественного языка (NLP): основные концепции и инструменты. – URL: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/705482/ (дата обращения: 10.03.2025).

6. Кластеризация графов и поиск сообществ: алгоритмы и методы. – URL: https://habr.com/ru/companies/dca/articles/265077/ (дата обращения: 06.03.2025).

7. *Андрушкевич Д. В., Ермаков Г. А.* Исследование влияния социальных сетей на формирование общественного мнения // Материалы 33-й НТК «Методы и технические средства обеспечения безопасности информации». – 2024. – С. 120–122.

8. Нотация функционального моделирования IDEF0: руководство по применению. – URL: https://habr.com/ru/sandbox/31234/ (дата обращения: 06.03.2025).

Д. Н. Бирюков
доктор технических наук, профессор;
А. В. Телишев

АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ

Проведен анализ открытых источников на наличие информации, раскрывающей технологии, на которых основаны системы контроля и управления доступом. Рассмотрены технологии радиочастотной идентификации с позиции безопасности. Проведено моделирование атак на распространенные радиочастотные идентификаторы. Рассмотрены потенциальные угрозы физической безопасности информации. Выдвинуты предложения по повышению уровня безопасности систем контроля и управления доступом.

Ключевые слова: система контроля и управления доступом, RFID, MIFARE, смарт-карта, proxmark3.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних двух десятилетий системы радиочастотной идентификации (RFID) стали важным элементом повседневной жизни. В процессе исследования был проведен анализ защищенности систем контроля и управления доступом (СКУД), основанных на использовании RFID-устройств – смарт-карт. К ним относятся цифровые паспорта, персональные электронные карты военнослужащих, банковские и транспортные карты.

Министерство обороны США одним из первых начало внедрение технологии смарт-карт (рис. 1) с целью обеспечения доступа и аутентификации пользователей. В отличие от стран СНГ, где до недавнего времени смарт-карты преимущественно применялись для контроля физического доступа, правительственные организации США сразу начали использовать их в качестве средства идентификации, интегрированного со всеми возможными формами доступа, включая физические пропуска на объекты, вход в рабочие системы на компьютерах и доступ к электронной почте.



Рис.1. Пример смарт-карт

В мае 2022 года специалист в области информационной безопасности Брайан Кребс обнаружил критическую уязвимость [1] в самой концепции использования этих карт. Такая уязвимость привела к заражению стиллером значительного числа рабочих станций офицеров армии США. Хотя данная история не связана с уязвимостями в технологиях и программном обеспечении, она подчеркивает масштабы потенциальных угроз, возникающих при внедрении RFID-технологий в государственный и оборонный сектора.

В августе 2017 года Московским городским судом было завершено рассмотрение уголовного дела, возбужденного в отношении группы лиц, обвиняемых в несанкционированном доступе к системе защиты проездной карты «Тройка» [2]. Основанием для проведения данной атаки послужило использование в системе проездных карты стандарта MIFARE. В частности, был задействован устаревший стандарт MIFARE Classic, который был скомпрометирован еще в 2008 году [3]. Именно этот стандарт применялся в системе оплаты проезда в Москве, что позволило злоумышленникам осуществить несанкционированный доступ к данным и осуществить их неправомерное использование.

Технологии, применяемые в смарт-картах государственных органов США и в персональных электронных идентификационных картах военнослужащих Министерства обороны Российской Федерации, остаются недоступными для публичного ознакомления. Тем не менее, проведенный анализ информации, полученной из открытых источников, позволяет сформулировать определенные выводы. Вследствие этого результаты осуществленных исследований сохраняют свою значимость, отражая текущий уровень защищенности систем контроля и управления доступом.

АНАЛИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ

Согласно статистике [4], за первые два квартала 2024 года объем денежного оборота Российского сегмента в сфере СКУД превысил 600 миллионов рублей. Было заключено более 800 договоров с 38 компаниями-производителями. В свою очередь, самый крупный в России производитель СКУД – компания REPco – адаптирует свои системы всего под три основных технологии: EM-Marine, HID и MIFARE [5]. Ввиду низкой стоимости и ряда других причин в рейтинге продаж лидирует технология EM-Marine, которая и вовсе не имеет никакой защиты [6, 7]. А компания HID, разработавшая одноименный стандарт, недавно ушла из России, прекратив поддержку установленных СКУД [8], большая часть которых итак работает на незащищенной технологии Hid Prox.

В итоге самой распространенной, поддерживающей при этом механизмы защиты технологией остается MIFARE.

По данным с официального сайта Единой информационной системы в сфере закупок, летом 2021 года Министерство обороны РФ заключило с одной из отечественных компаний договор о покупке технических средств охраны объектов на сумму в 192 миллиона рублей [9]. При этом в договоре указывается, что данными средствами будут оснащаться объекты всех трех категорий, включая такие стратегические объекты, как органы управления государством и пункты командования Генерального штаба ВС РФ. Также в договоре указано, что в Министерство обороны будет поставляться автономная система контроля доступа «Стрелец КПП» из состава комплекса технических средств охраны «Стрелец-Часовой 1 СВ». По информации из официальной документации комплекса, считыватели, входящие в его состав, поддерживают только упомянутые выше технологии MIFARE и EM-Marine (табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент таблицы «Перечень средств контроля и управления доступом»

№	Название и условное обозначение	Прототип	Примечание
1	Считыватель СЧ-Р08, СТФВ.466349.031	Считыватель PR-P08	Считыватель карт формата Mifare настольный
2	Считыватель СЧ-Р15, СТФВ.466349.034	Считыватель PNR-P15	Считыватель карт формата Mifare
3	Считыватель СЧ-Р19, СТФВ.466349.035	Считыватель PNR-P19	Считыватель карт формата Mifare
4	Считыватель СЧ-Р26, СТФВ.466349.036	Считыватель PNR-P26	Считыватель карт формата Mifare
5	Считыватель СЧ-ЕН08, СТФВ.466349.024	Считыватель PR-EH08	Считыватель карт формата EM-Marine настольный
6	Считыватель СЧ-ЕН15, СТФВ.466349.027	Считыватель PNR-EH15	Считыватель карт формата EM-Marine настольный
7	Считыватель СЧ-ЕН19, СТФВ.466349.028	Считыватель PNR-EH19	Считыватель карт формата EM-Marine настольный

Помимо глобальной закупки в министерство, отдельные учреждения МО РФ, такие как 3-й и 4-й ЦНИИ, Военная академия войсковой ПВО, Военная академия тыла и транспорта, Военный университет, Военно-медицинская академия, Военная академия войск РХБЗ и Военная академия связи, также ввели в эксплуатацию похожие СКУД.

Итак, технологии MIFARE являются самым популярным в России решением в системах контроля доступа, в которых реализованы механизмы защиты. Однако нет ничего совершенного, тем более в вопросах информационной безопасности. MIFARE, в различных реализациях, имеет ряд известных уязвимостей, которые были обнаружены после раскрытия алгоритма шифрования американскими исследователями в 2008 году [3]. Более того, процесс изучения безопасности не останавливается и по сей день – в августе 2024 года французские исследователи обнаружили аппаратный бэкдор в картах MIFARE Classic [10].

Все эти уязвимости дают возможность чтения данных с карт и их клонирования, что может привести к нарушению физической безопасности информации. Именно поэтому исследования безопасности систем контроля и управления доступом, реализованных по технологиям MIFARE, являются актуальными для вопросов обеспечения обороноспособности государства.

ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В ВОПРОСЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В памяти RFID-метки обычно содержатся два типа данных: постоянные и перезаписываемые. К постоянным относятся уникальные идентификаторы и данные о производителе карты. Однако для имитации меток (не всегда легальной) используют так называемые Chinese Magic card с возможностью перезаписи и этих данных. Ко второму типу относятся все остальные данные, используемые по своему прямому назначению.

Существуют два основных типа RFID-систем: работающие на низкой (Low-Frequency) и высокой (High-Frequency) частотах (рис. 2).

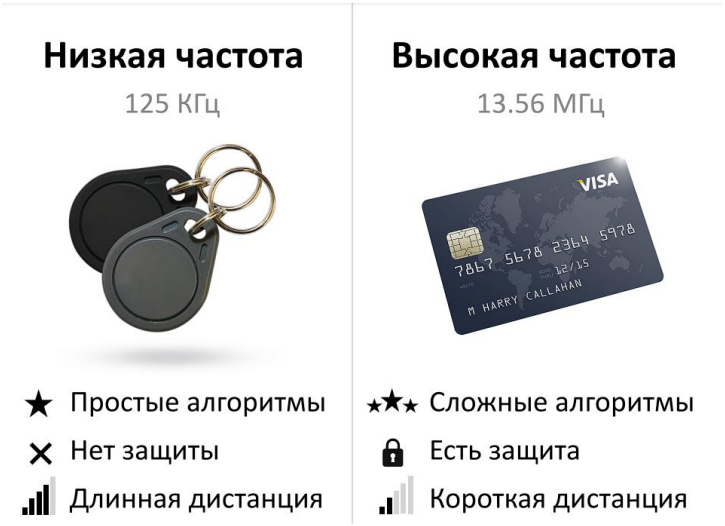


Рис. 2. Краткое сравнение высоко- и низкочастотных RFID меток

Низкочастотные метки находят широкое применение в системах, где не требуется высокая степень безопасности. Они используются для доступа в здания, в качестве ключей от домофонов, а также в качестве абонентских карточек в тренажерных залах. Благодаря своей дальности действия, их удобно применять на платных парковках, где водителю не нужно подносить карту близко к считывающему устройству, так как она срабатывает на расстоянии.

Однако стоит отметить, что низкочастотные метки обладают ограниченными возможностями из-за низкой скорости передачи данных. Это делает невозможным реализацию сложных двусторонних функций, таких как контроль баланса и криптография. Эти метки передают только свой короткий идентификатор без каких-либо средств аутентификации.

Низкочастотные устройства работают на основе пассивной технологии RFID в диапазоне частот от 30 до 300 кГц, хотя обычно используется частота от 125 до 134 кГц.

Наиболее популярные протоколы с частотой 125 кГц:

• EM-Marin – этот протокол является самым распространенным в СНГ, благодаря своей простоте и стабильности. Считывается с расстояния около метра.

• HID Prox II — это низкочастотный протокол, созданный упомянутой выше компанией HID Global и пользующийся наибольшей популярностью в западных странах. Он отличается повышенной сложностью операций, а платы и считыватели для него стоят относительно дорого.

Высокочастотные метки с частотой 13,56 МГц предназначены для более сложных взаимодействий между считывателем и меткой. Они широко применяются в случаях, когда требуется защита данных, двусторонняя передача больших объемов информации, аутентификация и другие подобные функции. Такие метки можно встретить в банковских картах, проездных и других защищенных пропусках.

Высокочастотные метки представляют собой набор стандартов и протоколов. Их часто называют NFC-метками, но это не всегда корректно. Основополагающим стандартом, используемым на физическом и логическом уровнях, является ISO 14443. И только поверх этого стандарта созданы протоколы высокого уровня.

Проще говоря, архитектура NFC работает следующим образом: протокол передачи, выбранный производящей компанией, реализуется на основе низкоуровневого стандарта ISO 14443. Например, высокоуровневый протокол MIFARE, произведенный компанией NXP, на более низком уровне основан на стандарте ISO 14443-A (рис. 3).

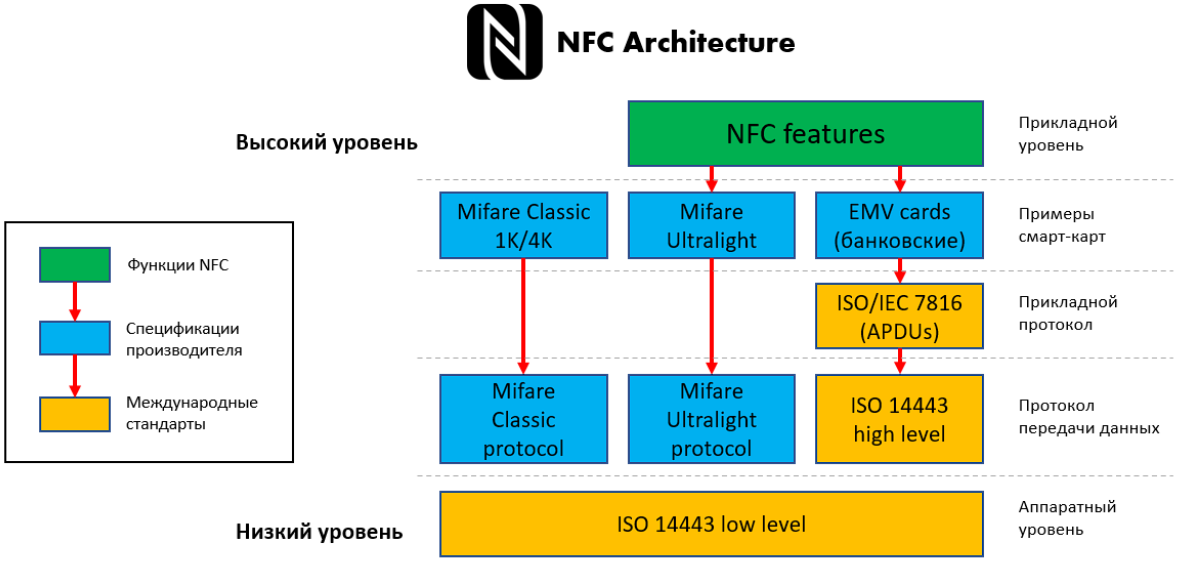


Рис. 3. Архитектура протоколов NFC-меток

Все высокочастотные смарт-карты, соответствующие стандарту ISO 14443-A, обладают уникальным идентификатором чипа (UID), который служит их серийным номером, подобно MAC-адресу сетевой карты. Обычно длина UID составляет 4 или 7 байт, но может достигать 10 байт. Эти идентификационные данные не являются секретными и могут быть легко прочитаны, а иногда они даже нанесены на саму карту.

Существует множество систем контроля доступа, которые используют только UID для аутентификации и предоставления доступа. Это может происходить даже в случае поддержки RFID-метками криптографии. Неправильное использование таких меток ставит их на уровень обычных карт с частотой 125 кГц с точки зрения безопасности.

Высокочастотные карты специально разработаны таким образом, чтобы их приходилось размещать близко к считывающему устройству. Это также помогает защитить карту от несанкционированного взаимодействия. Максимальный диапазон чтения, при условии использования специально изготовленных считывателей с большим радиусом действия, составляет около 15 см.

Скорость передачи данных до 424 кбит/с позволяет использовать сложные протоколы с полноценной двусторонней передачей данных. Что, в свою очередь, позволяет использовать криптографические алгоритмы для повышения уровня безопасности.

Итак, смарт-карты стандартов MIFARE, анализ безопасности которых будет проведен, работают на частоте 13,56 МГц, что позволяет реализовывать различные, в том числе самые высокие, уровни защиты.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ MIFARE С ПОЗИЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ

По мере своего развития стандарты MIFARE пополнялись новыми технологиями, реализующими различные механизмы безопасности и хранения данных (табл. 2).

Первой появилась технология *MIFARE Classic*, ставшая впоследствии самой распространенной в мире. Безопасность данной технологии основывается на алгоритме шифрования CRYPTO1 [11], который был разработан специально для нее и нигде больше не использовался. Но стойкость данного алгоритма основывалась только на засекреченности самого алгоритма и была взломана еще в 2008 году, о чем было написано выше.

В связи с невозможностью защитить карты с технологией Classic, была разработана технология *MIFARE Plus*. Ключевой особенностью данного семейства является изменяемый уровень безопасности (SL 0-3). И если на уровне SL1 карта полностью эмулирует карту Classic, то SL3 уже поддерживает шифрование алгоритмом AES.

Семейство *MIFARE Ultralight* объединяет самые простые карты, как без криптографической защиты, так и с использованием алгоритма 3DES.

Самые надежные и защищенные карты относятся к стандарту *MIFARE DESFire*. В этих картах реализован свободный выбор алгоритма шифрования: DES, 3DES или AES, а также внедрен микропроцессор для вычислений.

Таблица 2

Сравнительная таблица технологий MIFARE

<table>
<tr><th colspan="3">Тип карты</th><th>Уровень защиты</th><th>Алгоритм шифрования</th><th>Длина UID, байт</th><th>Объем памяти, байт</th><th>Организация памяти</th></tr>
<tr><td rowspan="10">MIFARE</td><td rowspan="2">Classic</td><td>1k</td><td rowspan="2">Низкий</td><td rowspan="2">CRYPTO1</td><td>4</td><td>1024</td><td>16сек/64байт</td></tr>
<tr><td>4k</td><td>4</td><td>4096</td><td>32сект/64байт, 8сект/256байт</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Plus</td><td>S 2k</td><td rowspan="4">Высокий (на SL3)</td><td rowspan="4">AES (на SL3)</td><td rowspan="4">7</td><td>2048</td><td>32сект/4бл</td></tr>
<tr><td>S 4k</td><td>4096</td><td>32сект/4бл, 8сект/16бл</td></tr>
<tr><td>X 2k</td><td>2048</td><td>32сект/4бл</td></tr>
<tr><td>X 4k</td><td>4096</td><td>32сект/4бл, 8сект/16бл</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ultralight</td><td></td><td>Нет</td><td>Нет</td><td rowspan="2">7</td><td>64</td><td>16стр/4байт</td></tr>
<tr><td>C</td><td>Высокий</td><td>3DES</td><td>148</td><td>36стр/4байт</td></tr>
<tr><td rowspan="3">DESFire</td><td>EV 2k</td><td rowspan="3">Очень высокий</td><td rowspan="3">DES/3DES/AES</td><td rowspan="3">7</td><td>2048</td><td rowspan="3">Определяется программой</td></tr>
<tr><td>EV 4k</td><td>4096</td></tr>
<tr><td>EV 8k</td><td>8192</td></tr>
</table>

На территории России получили наибольшее распространение стандарты Mifare Classic и Mifare Plus. В рамках представленного исследования будут рассмотрены именно эти стандарты.

С момента рассекречивания алгоритма CRYPTO1, который используется в стандартах Mifare Classic и Plus (на SL1), прошло много времени, поэтому сейчас в сети можно найти достаточное количество информации по атакам, в которых эксплуатируются уязвимости этого алгоритма [12]:

1. *Nested* [13] – базируется на уязвимости генератора псевдослучайных чисел, основанного на LFSR, который позволяет вычислить последующее значение при условии знания предыдущего. То есть, зная хотя бы один ключ, мы можем восстановить все остальные. При этом для атаки нам понадобится лишь валидный тег и один ключ, обычно узнаваемый с помощью перебора.

2. *Dark side* [14] – атака, позволяющая восстановить ключи по информации из сообщений об ошибках. Время эксплуатации существенно отличается от первой, однако после подбора хотя бы одного ключа можно перейти к ней.

В дополнение к упомянутым угрозам необходимо учитывать вероятность компрометации вследствие человеческого фактора. В частности, ключи на картах часто остаются неизменёнными, что существенно повышает риск их успешного подбора с использованием методов перебора по словарю.

Кроме того, стоит помнить и о *считывателе*, который зачастую остается вдалеке от камер и служб охраны, что позволяет злоумышленнику считывать информацию о ключах путем эмуляции карты. Лучше всего такие атаки реализуются при помощи известного устройства *Flipper Zero* (рис. 4). Встроенное в него программно-аппаратное обеспечение позволяет достаточно просто извлечь ключи из считывателя.



Рис. 4. Пример работы Flipper Zero в ходе эмуляции смарт-карт MIFARE

Последним вариантом взлома всех подобных смарт-карт является атака путем «прослушивания» данных, передаваемых между смарт-картой и считывателем во время авторизации. Однако этот способ требует полного отсутствия контроля считывателя другими средствами охраны.

Все эти атаки позволяют получить ключи для полного доступа ко всем секторам карты, что делает возможным не только чтение данных, но и их изменение. А использование так называемых *Chinese magic card*, в которых реализована возможность замены UID, позволяет злоумышленнику клонировать смарт-карты.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТАК НА СМАРТ-КАРТЫ MIFARE

Для моделирования атак использовалось специализированное оборудование с целью взаимодействия с RFID-устройствами под названием Proxmark3 easy (рис. 5). Это устройство обладает высокой степенью гибкости в плане программного обеспечения, характеризуется наличием собственного микропроцессора и внутренней памяти объемом 512 килобайт, что делает его оптимальным инструментом для исследователей в области безопасности RFID-технологий [15].



Рис. 5. Запуск среды для взаимодействия с устройством Proxmark3 easy

Помимо официального существует специализированное программное обеспечение для Proxmark3 на базе операционной системы Linux, обеспечивающей удобное и эффективное использование всех функциональных возможностей устройства [16]. Одним из ключевых преимуществ выбранных оборудования и программного обеспечения является наличие детальных руководств [17] по настройке и эксплуатации, что значительно упрощает процесс их использования и позволяет максимально эффективно применять их функциональные возможности.

После завершения процесса установки программного обеспечения и настройки рабочей среды для взаимодействия с ним был проведен тестовый эксперимент по клонированию RFID-ключа от домофона (рис. 6) [18]. В ходе исследования было установлено, что в данном случае используется стандартный протокол EM4102 для домофонных систем, функционирующий на частоте 125 кГц. После нескольких неудачных попыток записи данных выяснилось, что RFID-метки, соответствующие стандарту EM4102, являются неперезаписываемыми. В связи с этим возникла необходимость использования альтернативного ключа, оснащенного меткой стандарта T5507, который был предоставлен для проведения эксперимента. Таким образом, первая поставленная задача была успешно решена.



Рис. 6. Информация о метке (слева) и Proxmark3 easy в ходе работы (справа)

Следующей для рассмотрения поступила смарт-карта системы контроля оплаты проезда «Подорожник». Первичный анализ сигнатуры показал, что в карте используется технология *MIFARE Plus S 4K* (SL1), где SL1 указывает на первый уровень безопасности. Как было отмечено ранее, карта фактически имитирует устаревший и менее защищенный стандарт *MIFARE Classic*. В связи с этим предполагается, что процесс получения доступа к секторам данной карты может быть относительно несложным.

Стандартные методы тестирования, встроенные в программное обеспечение устройства Proxmark3, позволили оперативно восстановить ключи посредством применения методов перебора и атаки hardnested (рис. 7). В результате был получен дамп данных карты «Подорожник», что предоставляет потенциальному злоумышленнику возможность модификации значения баланса на карте. Модификация осуществляется путем перезаписи данных, находящихся в диапазоне от нулевого до третьего байта нулевого блока четвертого сектора. Данная информация была получена в результате детального анализа дампа карты и изучения данных, доступных в интернете.

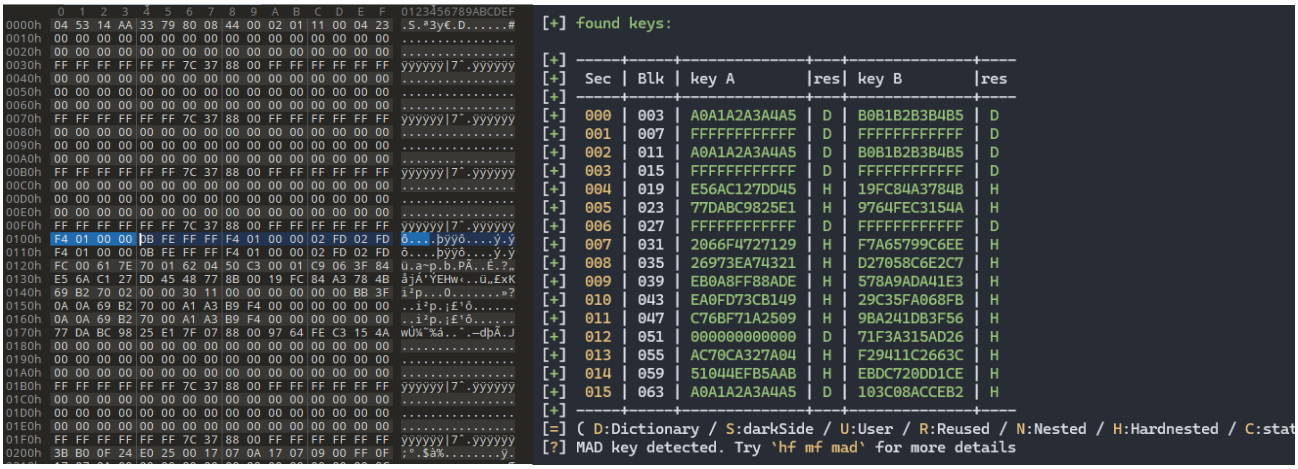


Рис. 7. Байты, означающие баланс на карте (слева), и найденные в ходе атаки ключи (справа)

Примечательно, что даже проездной документ для льготных категорий граждан (БСК) не обладает повышенной степенью защиты. В его основе лежит стандарт MIFARE Plus EV1, который функционирует на том же уровне безопасности, что и в случае с проездным документом (SL1). Это позволяет осуществить повторную успешную реализацию атаки с последующим считыванием данных. Анализ полученных данных выявил наличие следующей информации (рис. 8):

– фамилия, имя и отчество владельца;
– паспортные данные;
– количество осуществленных поездок;
– дата окончания срока действия проездного документа.

На основании полученных данных был разработан специализированный скрипт, предназначенный для декодирования информации, содержащейся на проездном документе.

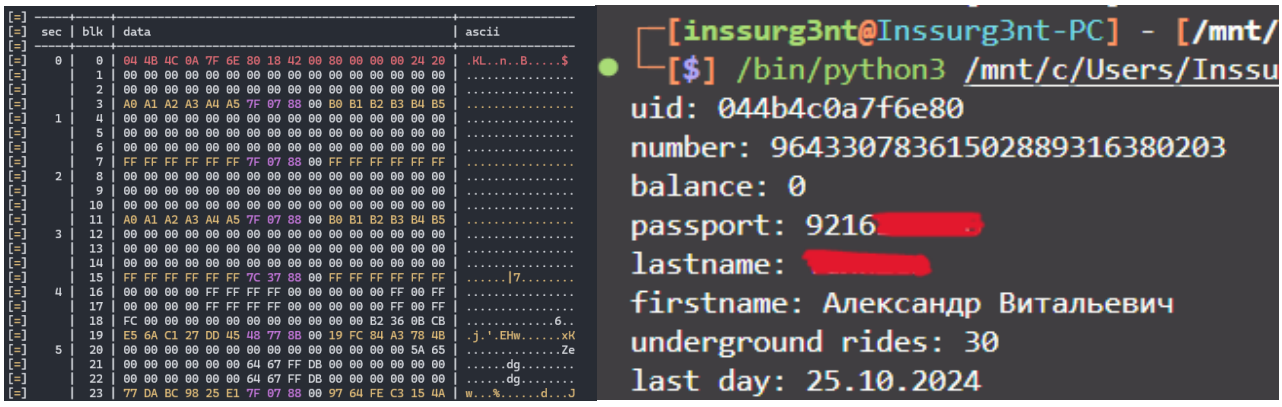


Рис. 8. Данные, хранящиеся на БСК в сыром виде (слева), и декодированные данные (справа)

Заключительным объектом исследований стала карта дежурного. В ходе анализа было установлено, что данная карта функционирует на основе стандарта *MIFARE Classic 1K*. Анализ показал, что ключи доступа ко всем секторам имеют одинаковое значение FFFFFFFFFFFF. Это обстоятельство создает уязвимость, поскольку делает возможным несанкционированное клонирование карты. Поддельная карта может быть использована для получения доступа не только к помещениям подразделений в нерабочее время, но и к коридору руководства организации (рис. 9).



Рис. 9. Информация о карте дежурного (слева), и найденные ключи к ней (справа)

Приведенные выше примеры атак не представляют значительной угрозы для безопасности, поскольку в транспортных системах, вероятно, реализованы дополнительные механизмы защиты, такие как регулярные сверки истории операций с базой реальных данных. Тем не менее, рассмотренные примеры демонстрируют, что недостаточный уровень защищенности систем контроля и управления доступом является актуальной проблемой. Эта проблема может поставить под угрозу не только функционирование второстепенных объектов, но и безопасность более значимых инфраструктурных элементов.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ УГРОЗЫ ФИЗИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

После изучения представленного материала возникает закономерный вопрос о потенциальных действиях нарушителя после успешного преодоления этапа физической защиты. Рассмотрим наиболее распространенные методы, которые могут быть применены злоумышленником в данной ситуации.

Один из наиболее распространенных методов, используемых злоумышленниками, заключается в эксплуатации легитимных учетных записей. Не каждый сотрудник организации осуществляет корректное завершение сеанса работы при покидании рабочего места. В результате разблокированный компьютер предоставляет прямой доступ к локальной сети организации, что может быть использовано для распространения вредоносного программного обеспечения, внедрения вредоносного кода в систему или несанкционированного доступа к конфиденциальной информации.

Более трудоемкий, но при этом надежный метод – извлечение данных с жестких дисков. Пользователи редко задумываются о защите или шифровании информации на жестких дисках, что делает возможным несанкционированный доступ к данным при прямом подключении диска к устройствам злоумышленника. В результате нарушитель получает возможность извлечения дампа памяти для последующего анализа или установки вредоносного программного обеспечения. Кроме того, в файловой системе могут быть обнаружены пароли от учетных записей или, по крайней мере, их хэши. Применение режима ожидания на компьютере делает работу нарушителя еще более эффективной, поскольку компьютер не фиксирует факт извлечения жесткого диска.

В случае, если данные на жестком диске зашифрованы, а компьютер регулярно блокируется, злоумышленники могут осуществить атаку холодной загрузки [19]. Эта техника позволяет получить доступ к содержимому оперативной памяти путем аппаратной перезагрузки системы и перенаправления управления на загрузочное устройство, такое как USB-накопитель. Загрузочный код данного устройства способен считывать нестертые данные из

оперативной памяти. Важно отметить, что перезагрузка должна быть выполнена аппаратным способом, так как программная перезагрузка приведет к завершению всех процессов и очистке оперативной памяти.

При упоминании USB-накопителя в первую очередь следует обратить внимание на угрозу BadUSB-атаки. Под этим термином подразумевается класс атак, направленных на USB-порт, к которому подключается устройство, имитирующее клавиатуру, мышь, сетевую карту или любое другое периферийное оборудование компьютера (рис. 10). В случае, если в USB-устройство, которым может быть даже веб-камера, встроен контроллер HID-устройства [20], злоумышленник способен мгновенно выполнить любую команду на компьютере жертвы путем нажатия клавиш или их комбинаций, таких как Win-R или Alt-F2, что в дальнейшем может позволить ему реализовать удаленное выполнение кода.

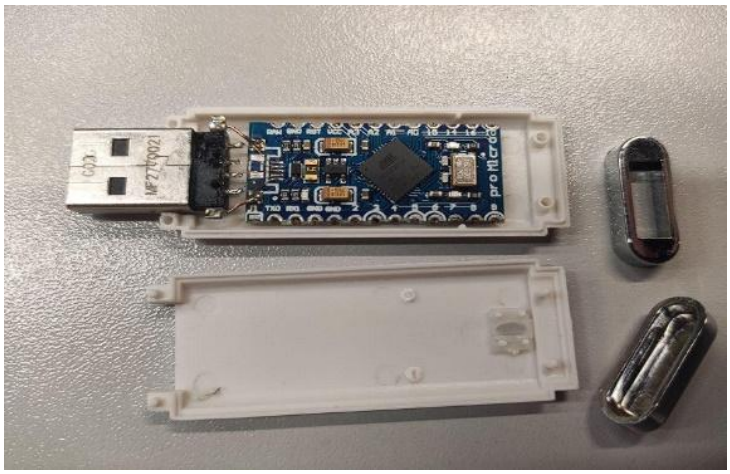


Рис. 10. Клавиатура в корпусе USB-накопителя

Еще одной разновидностью BadUSB-атаки является BadUSB-ETH-атака. В этом случае устройство идентифицируется как сетевая карта [21], что позволяет злоумышленнику полностью перехватывать сетевой трафик и даже управлять ходом атаки через встроенный модуль Wi-Fi.

Одним из менее очевидных, но наиболее простых и быстро реализуемых методов атаки является использование USB-модема [22] для перехвата сетевого трафика [22]. USB-модемы, оснащенные операционной системой Linux, могут функционировать в качестве автономных устройств, интегрируясь в локальную сеть организации без привлечения значительного внимания. Это позволяет злоумышленнику установить скрытное присутствие в сети, выполнив минимальное количество действий. Принцип работы заключается в том, что USB-модем может взаимодействовать с локальной сетью, к которой подключен компьютер жертвы, а также осуществлять обмен данными с атакующим через 4G-канал.

Таким образом, злоумышленник получает возможность контролировать и перехватывать информацию, циркулирующую в локальной сети, используя модем в качестве промежуточного узла.

Кроме того, следует учитывать возможность атак, направленных на использование портов и сетевых кабелей Ethernet. Злоумышленник, получив несанкционированный доступ на объект, может легко установить устройства для перехвата данных непосредственно на кабелях Ethernet, что позволит ему анализировать сетевой трафик [23] (рис. 11). Аналогичным образом подключение к сетевым портам Ethernet предоставляет возможность управления и мониторинга проходящего трафика [24], включая его перенаправление через виртуальные частные сети (VPN) и беспроводные адаптеры.

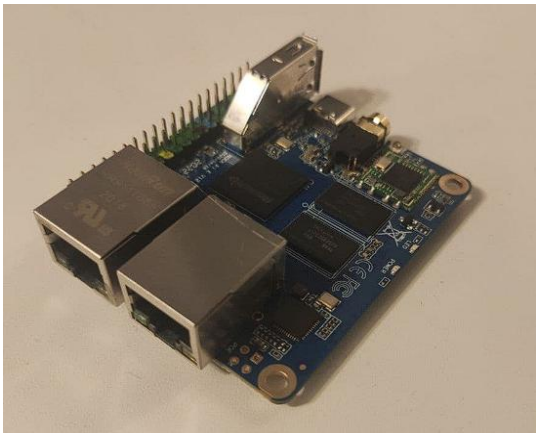


Рис. 11. Аппаратная закладка для закрепления через порты Ethernet

Безусловно, существует множество других техник [25], позволяющих закрепиться в системе при наличии физического доступа к компьютерам сотрудников и другому оборудованию организации, что подчеркивает важность организации пропускного режима, в том числе путем правильного использования систем контроля управления доступом.

РЕКОМЕНДАЦИИ

По результатам анализа уровня безопасности RFID-карт могут быть выявлены случаи, когда фактический уровень безопасности карт не соответствует предъявляемым требованиям и стандартам безопасности. Наиболее простым и быстрым решением проблемы является замена существующих карт, имеющих низкий или недостаточный уровень защиты, на карты с современными криптографическими алгоритмами. На сегодняшний день к числу наиболее защищенных и рекомендованных к использованию типов смарт-карт относится MIFARE DESFire EV2/EV3. В некоторых случаях может быть целесообразно создание собственного стандарта смарт-карт для обеспечения максимальной степени защиты и соответствия индивидуальным требованиям организации. Реализация подобного решения позволит создать надежную, полностью контролируемую инфраструктуру, значительно превосходящую по уровню защищенности стандартные решения.

Для дополнительного повышения безопасности и защиты от несанкционированного клонирования и перехвата сигналов рекомендуется рассмотреть возможность создания системы контроля и управления доступом на нестандартной частоте. Данное решение позволит существенно снизить вероятность атак, так как большинство распространенных считывателей и устройств клонирования не рассчитаны на работу за пределами стандартных диапазонов (125 кГц, 13.56 МГц).

Частота должна быть выбрана таким образом, чтобы она не пересекалась с массово используемыми RFID-стандартами, но при этом соответствовала техническим и законодательным ограничениям. Необходима также разработка специализированных считывателей и RFID-меток, поддерживающих работу с нестандартной частотой и собственным стойким с точки зрения криптографии протоколом обмена данными.

Внедрение указанных рекомендаций позволит существенно повысить уровень безопасности и надежности RFID-систем и эффективно предотвратить возможные угрозы информационной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка актуальности исследования безопасности систем контроля и управления доступом (СКУД) показала их широкое применение как в коммерческих, так и в оборонных организациях. Анализ данных из открытых источников позволяет сделать выводы о технологиях, используемых в этих системах, основной из которых является стандарт MIFARE.

Моделирование атак на смарт-карты, соответствующих стандартам MIFARE, выявило наличие уязвимостей в существующих системах защиты. Это создает предпосылки для возможного проведения различных атак на инфраструктуру организаций. Потенциальный ущерб, который может быть нанесен в результате таких атак, свидетельствует о необходимости рассматривать СКУД как важное средство защиты компьютерных систем наравне с антивирусными средствами.

Список использованных источников

1. Критическая уязвимость смарт-карт в США // Habr. – 2021. – URL: https://habr.com/ru/companies/dcmiran/articles/666386/ (дата обращения: 12.01.2025).
2. Технологии и медиа. – URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/25/08/2017/599f0c6e9a7947641df10f03 (дата обращения: 12.01.2025).
3. Взлом смарт-карт Mifare Classic // The Register. – 2008. – URL: https://www.theregister.com/2008/03/12/mifare_classic_smartcard_crack/ (дата обращения: 13.01.2025).
4. Рейтинг брендов за период с 1 января по 15 сентября 2024 года // Ru-bezh. – 2021. – URL: https://ru-bezh.ru/kompanii-i-ryinki/news/24/09/21/reyting-brendov-za-period-s-1-yanvarya-po-15-sentyabrya-2024-god (дата обращения: 13.01.2025).
5. Контроллеры-считыватели // Perco. – URL: https://www.perco.ru/products/kontrollery-schityvateli/ (дата обращения: 17.01.2025).
6. Proximity-карты: принцип работы и уязвимости. – URL: https://securityrussia.com/blog/proximity-card.html (дата обращения: 19.01.2025).
7. Proximity-карты: технологии и безопасность. – URL: https://securityrussia.com/blog/proximity-card.html (дата обращения: 19.01.2025).
8. Уйти нельзя остаться // Ru-bezh. – 2021. – URL: https://ru-bezh.ru/journal-44/48424-ujti-nelzya-ostatsya (дата обращения: 19.01.2025).
9. Госзакупка № 0173100004521001350 // Zakupki.gov.ru. – URL: https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/za44/view/common-info.html?regNumber= 0173100004521001350 (дата обращения: 10.02.2025).
10. Recent Advances in Cryptanalysis // IACR ePrint. – 2024. – URL: https://eprint.iacr.org/2024/1275 (дата обращения: 10.02.2025).
11. Crypto-1. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Crypto-1 (дата обращения: 14.02.2025).
12. Взлом Mifare // Xakep. – 2023. – URL: https://xakep.ru/2023/09/14/hacking-mifare/ (дата обращения: 24.02.2025).
13. Security Analysis of RFID Systems // ScienceDirect. – 2012. – URL: https://doi.org/10.1016/j.cose.2012.03.002. (28.02.2025)
14. Cryptanalysis of Mifare Classic // IACR ePrint. – 2009. – URL: https://eprint.iacr.org/2009/137.pdf (дата обращения: 03.03.2025).

15. Разновидности Proxmark3 // Pikabu. – URL: https://pikabu.ru/story/raznovidnosti_proxmark3_8589983 (дата обращения: 03.03.2025).
16. Proxmark3 Official Repository // GitHub. – URL: https://github.com/ RfidResearchGroup/proxmark3 (дата обращения: 10.03.2025).
17. Getting Started with Proxmark3 Easy // Dangerous Things Forum. – URL: https://forum.dangerousthings.com/t/getting-started-with-the-proxmark3-easy/9050 (дата обращения: 10.03.2025).
18. ProxSpace Releases // GitHub. – URL: https://github.com/Gator96100/ProxSpace/releases (дата обращения: 10.03.2025).
19. Cold Boot Attack // Xakep. – 2023. – URL: https://xakep.ru/2023/01/17/cold-boot-attack/ (дата обращения: 10.04.2025).
20. Very Bad USB // Xakep. – 2023. – URL: https://xakep.ru/2023/02/09/very-bad-usb/ (дата обращения: 10.04.2025).
21. BadUSB ETH // Xakep. – 2023. – URL: https://xakep.ru/2023/02/22/badusb-eth/ (дата обращения: 10.04.2025).
22. Evil Modem // Xakep. – 2023. – URL: https://xakep.ru/2023/03/16/evil-modem/ (дата обращения: 10.04.2025).
23. Croc in the Middle // Xakep. – 2023. – URL: https://xakep.ru/2023/01/25/croc-in-the-middle/ (дата обращения: 10.04.2025).
24. Невидимое устройство // Xakep. – 2023. – URL: https://xakep.ru/2023/03/23/invisible-device/ (дата обращения: 10.04.2025).
25. Перечень статей // Xakep. – URL: https://xakep.ru/author/s0i37/ (дата обращения: 10.04.2025).

В. С. Богданов[1],
кандидат технических наук;
А. А. Лазарев[2],
кандидат технических наук;
Д. Ю. Паршунин[3]
[1]Восьмое управление ГШ ВС РФ, Москва.
[2]Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.
[3]Институт инженерной физики, г. Серпухов Московской обл.

МЕТОД СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЕДИНОЙ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ МИНОБОРОНЫ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

В условиях высокой интенсивности изменения обстановки на театре военных действий целесообразно внедрять и использовать интеллектуальные многоагентные системы. В статье предложен метод структурно-функционального анализа на основе результатов исследования функционирования единой мультисервисной сети Минобороны России с использованием подобных интеллектуальных многоагентных систем.

Ключевые слова: повышенная динамика ведения войн, система управления в едином информационном пространстве, сканирование подсетей, увеличение глубины сканирования при уменьшении времени сканирования, агент-планировщик, анализ защищаемой системы.

Анализ применения Вооруженных Сил Российской Федерации на различных театрах военных действий показал, что наиболее эффективная форма ведения военных действий – формирование межведомственных и межвидовых группировок войск (сил) на операционном направлении, по направлениям действий (на направлении главного удара, направлении сосредоточения основных усилий и т. п.). Формирование группировок войск (сил) предполагает наращивание системы управления (в том числе емкости стационарной сети связи, развертывание полевых узлов и линий связи и т. п.), формирование и интеграцию в единую мультисервисную сеть (далее – ЕМСС) группировки войск (сил) сетей создаваемых воинских формирований.

В условиях быстро меняющейся обстановки, всестороннего воздействия противника возникает необходимость не только оперативной подготовки пунктов управления в части, касающейся оперативного развертывания средств сетевого взаимодействия и средств системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак (далее – СОПКА), но и обеспечение защиты информационных ресурсов. Основным назначением системы СОПКА является обеспечение защищенности информационных ресурсов от компьютерных атак и штатного функционирования данных ресурсов в условиях возникновения компьютерных инцидентов, вызванных компьютерными атаками [1].

На начальном этапе формирования (дооснащения) системы СОПКА должны осуществляться анализ защищаемой системы с обозначением всех уязвимых мест, идентификация угроз и уязвимостей, а также оценка рисков для информационных ресурсов [2].

В условиях повышенной динамики ведения войн, наращивания сетей связи и интеграции в ЕМСС группировки войск (сил) сетей воинских формирований процесс отслеживания изменений о сегментах и элементах ЕМСС специалистами центров мониторинга (далее – ЦМ) весьма затруднен [3, 4]. В связи с этим возникает необходимость оперативного сбора информации о сегментах и элементах ЕМСС, их размещении и взаимодействии, сетевом оборудовании, реализованных сервисах и службах, параметрах их состояний, о выявлении уязвимостей системы.

Единая мультисервисная сеть является сложной территориально распределенной системой, насчитывающей в своем составе тысячи специализированных устройств. Основная задача ЕМСС – обеспечить функционирование и взаимодействие информационных систем, систем управления военного и специального назначения в едином информационном пространстве. Указанные системы могут находиться в разных сегментах сети, подключение которых к ЕМСС осуществляется с использованием информационно-телекоммуникационных сетей общего пользования (ИТКС ОП), радиорелейной и спутниковой связи путем реализации виртуальных частных сетей (рис. 1).

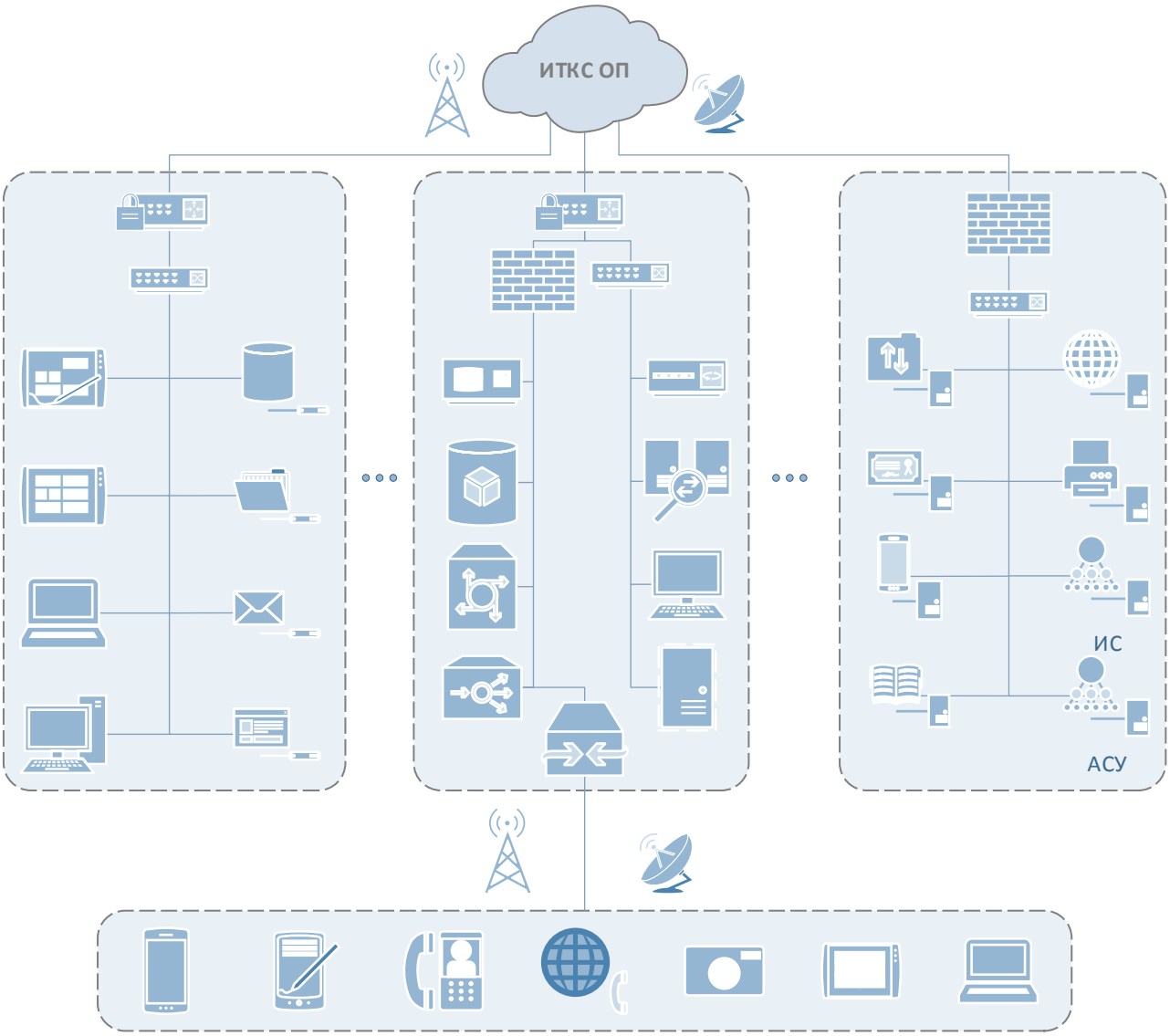


Рис. 1. Пример интеграции информационных систем в ЕМСС

Инвентаризация активов заключается в сканировании подсетей и объектов ЕМСС. В процессе инвентаризации осуществляется сбор информации о физической топологии сети, ее сегментах и элементах, об их размещении и взаимодействии, сетевом оборудовании, реализованных сервисах и службах, параметрах их состояний, уязвимостях системы. Методы сканирования могут быть либо пассивными, при использовании которых собирается трафик, а содержимое пакетов анализируется для идентификации объектов и получения информации о них, либо активными, при применении которых отправляется запрос объекту и анализируются ответы. Пассивное сканирование не вносит никакой дополнительной нагрузки на сеть, но

оно не позволяет собрать полную информацию о состоянии ЕМСС (идентифицируются только те объекты, которые активно взаимодействуют). Активное сканирование обеспечивает гораздо более высокий уровень точности, хотя потенциально может помешать штатному функционированию объектов.

Время, точность и полнота результатов зависит от выбора параметров сканирования. К основным регулируемым параметрам сканирования относятся [5]:

- количество портов;
- глубина сканирования;
- скорость сканирования;
- параметры определения уязвимостей.

Инвентаризация по количеству портов, которые подвергаются сканированию, может быть трех видов: сканирование всех портов (TCP и UDP); всех TCP, выборочно UDP; всех UDP, выборочно TCP. Общее количество портов 65535. Поскольку сканирование UDP осуществляется медленнее, можно оценить максимальное время, затрачиваемое на инвентаризацию одного узла со стандартными параметрами по портам UDP. Оно составляет 18 часов.

Количество данных, собираемых с узла, – это глубина сканирования. Стандартно собираются: данные о топологии сети, сетевых средствах взаимодействия; установленные операционные системы и их версии; функционирующие сервисы и службы (их состояния); используемые криптографические протоколы; web-приложения и т. п. Количество собираемой информации определяет время сканирования.

Пропускная способность канала связи определяет скорость сканирования. Верхняя граница скорости сканирования должна обеспечить сохранение работоспособности сканируемого узла.

Наиболее широкий раздел СОПКА – выявление параметров уязвимостей. От них также сильно зависит скорость сканирования.

Учитывая вышесказанное, необходимо отметить, что существующие решения по сканированию объектов ЕМСС осуществляются с одного хоста, что дополнительно накладывает ограничения на выбор параметров сканирования (снижает полноту собираемой информации), а также существенно увеличивает время проведения инвентаризации активов.

Предлагаемое в рамках настоящей статьи решение по увеличению глубины сканирования (увеличению полноты собираемой информации) и уменьшению времени сканирования (повышению оперативности инвентаризации активов ЕМСС) заключается в применении интеллектуальных многоагентных систем (МАС), что позволит децентрализовать управление и сам процесс инвентаризации активов, распределить за счет этого ресурсозатраты между подсетями (объектами) ЕМСС, снизить нагрузку на каналы связи между ними и уменьшить время выполняемого процесса.

Снижение ресурсозатрат связано с тем, что агенты интегрируются в объект (подсеть) ЕМСС, которые сначала собирают информацию с устройств, а потом передают ее в систему управления агентами (рис. 2).

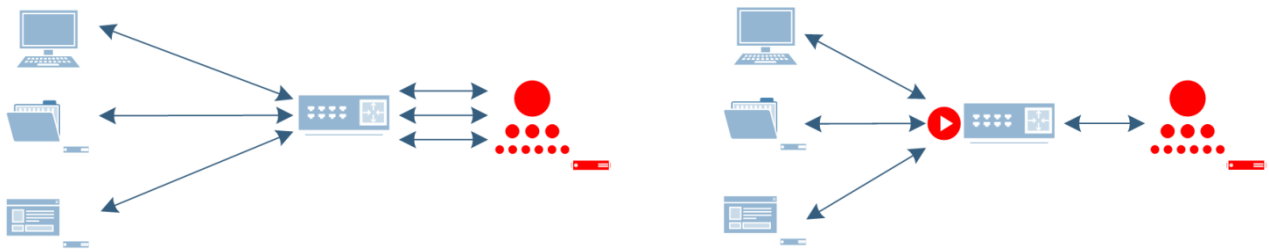


Рис. 2. Пример реализации МАС (справа)

Кроме того, использование интеллектуальных МАС позволит обеспечить масштабируемость системы, поскольку при формировании и интеграции в ЕМСС новых объектов (подсетей) применение в них МАС реализуется путем копирования группы агентов.

Многоагентная система – это система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами для решения сложных задач. Агенты – это независимые вычислительные процессы (агенты-сканеры), реализующие автономную коммуникационную функциональность, заключающуюся в обнаружении аппаратного и программного обеспечения, подключенного к локальной сети, и в извлечении подробной информации о каждом устройстве [6].

В общем виде математическая модель МАС может быть представлена кортежем:

$$MAS = \langle \Theta, P_{MAS}, E, \delta_{MAS}, S_{MAS}, s_{mas_0} \rangle,$$

где Θ – множество объектов ЕМСС;
P_{MAS} – множество параметров объектов ЕМСС;
δ_{MAS} – функция перехода между состояниями S_{MAS};
E – множество событий в ЕМСС;
S_{MAS} – множество состояний МАС;
$s_{mas_0} \in S_{MAS}$ – начальное состояние МАС.

Множество S_{MAS} всех возможных состояний МАС является декартовым произведением:

$$S_{MAS} = S_{\Theta_1} \times \ldots \times S_{\Theta_K} \times V_{p_1} \times \ldots \times V_{p_M} \times E,$$

где K – количество объектов ЕМСС;
S_{Θ_i} – множество состояний объекта, $i = \overline{1,K}$;
V_{p_j} – множество значений параметра, $j = \overline{1,M}$;
M – количество параметров ЕМСС.

Архитектура МАС содержит четыре основных функциональных модуля: web-платформу, базу данных, систему управления агентами и систему коммуникации (рис. 3) [6].

В связи с необходимостью обеспечения кросс-платформенной работы системы и необходимостью взаимодействия агентов между собой, администратором и базой данных, целесообразно использовать программное обеспечение в web-платформе.

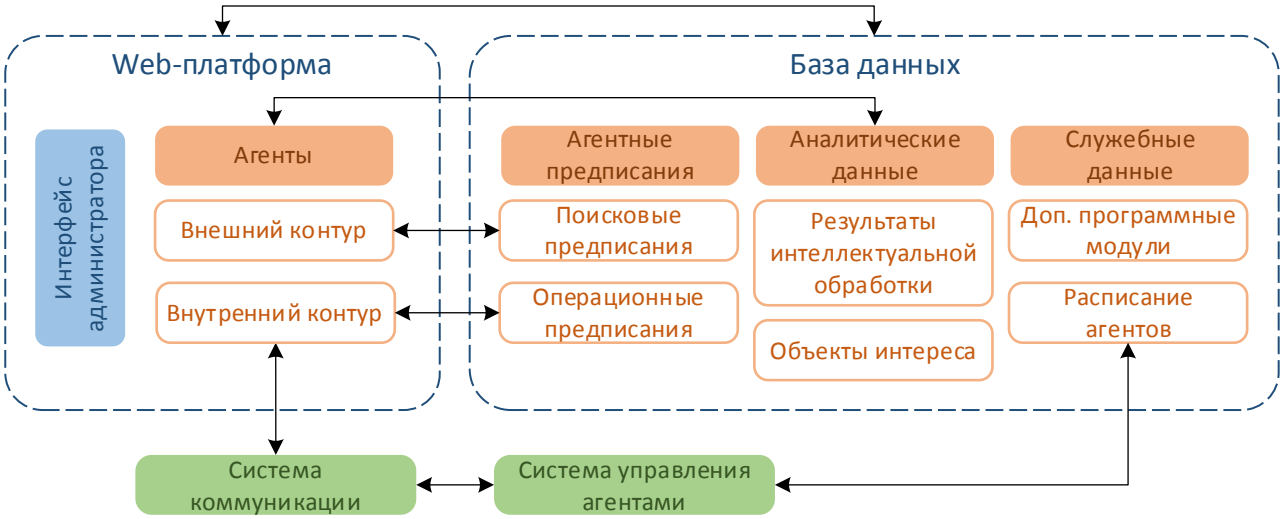


Рис. 3. Архитектура многоагентной системы

Система управления агентами выполняет управление задачами на основе расписаний, система коммуникации обеспечивает общение агентов между собой и базой данных.

Интеграция МАС в объекты (подсети) осуществляется по мере их включения в ЕМСС (рис. 4).

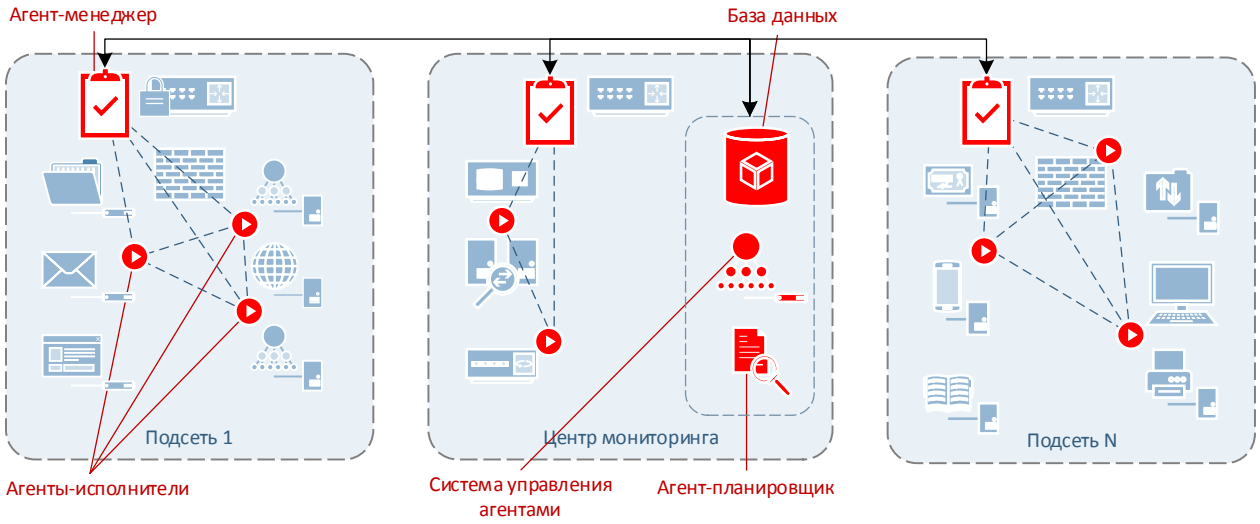


Рис. 4. Пример интеграции МАС в объекты ЕМСС

Инвентаризация активов ЕМСС делится на две фазы. Первая фаза, осуществляемая периодически или по команде администратора, заключается в определении подключения к ЕМСС новых объектов (подсетей). Поиск проводится по таблицам маршрутизации, таблицам MAC-адресов, VTP (VLAN), ICMP и ARP. Обнаружение новых объектов (подсетей) является основанием для начала второй фазы инвентаризации, которая заключается в копировании агентов-менеджеров и агентов-исполнителей в новые объекты (подсети) и запуске рабочих процессов по извлечению необходимой информации.

Сведения о новых объектах (подсетях), сценарии запуска и рабочие процедуры агентного поиска хранятся в базе данных системы.

Процедура занесения сведений в базу данных включает в себя указание названия и адреса, расписание сбора информации и дополнительных сведений, которые в конечном итоге могут значительно повлиять на результат агентной обработки данных, например, на указание предпочтительного алгоритма сбора информации, конечной формы представления данных, указание критических задач и т. д. [6, 7].

Агент-планировщик, согласно установленному расписанию, сканирует записи и создает рабочие процессы. На основе предписаний из записей информационного источника агенты-менеджеры создают задания для агентов-исполнителей, тем самым организуя агентные рабочие группы.

По результатам инвентаризации активов полученная информация позволит сформировать архитектуру (топологию) ЕМСС в виде графа.

Ориентированный граф $G = \{V, E, W\}$ представляет всю инфраструктуру ЕМСС. Устройства сети – множество вершин $V = \{v_1, \dots, v_N\}$, связи между устройствами – множество дуг $E = \{e_1, \dots, e_M\}$ (рис. 5).

Каждое устройство сети характеризуется набором данных и функций, которые оно способно выполнять: $f(dv_i, pv_i) = \left\{f_{d_i,p_i}^{(1)}, f_{d_i,p_i}^{(2)}, \dots, f_{d_i,p_i}^{(k)}\right\}$. Данные, взятые из базы данных МАС, могут включать в себя: типы устройств, максимальный размер пакета, данные протокола ARP, данные протоколов IP (TCP), описание соответствия между сетевыми и физическими адресами устройств, адреса IP-шлюзов и хостов, статистику о IP-пакетах. Функции могут представляться как сервисы и службы, реализуемые устройством, а также как параметры состояний и его уязвимостей.

Каждая дуга e_{ij} графа обладает некоторой характеристикой $\omega_{e_{ij}}$, которая может представляться как пропускная способность канала связи, помехоустойчивость, полоса пропускания, затухание, достоверность передачи данных, скорость модуляции.

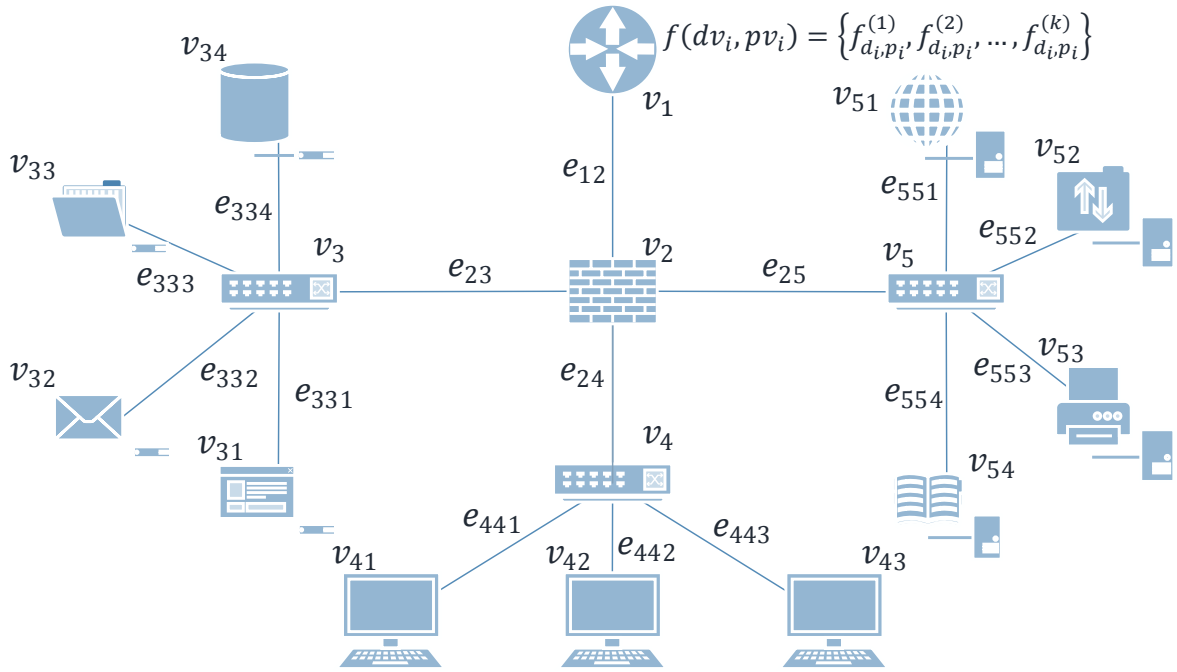


Рис. 5. Пример графа архитектуры сегмента компьютерной сети

Разработанный комплекс алгоритмов инвентаризации активов ЕМСС включает в себя алгоритмы: обнаружения физической топологии сети, формирования логической топологии сети (многослойной модели стека протоколов TCP/IP), добавления иерархии, обнаружения и добавления сервисов и зависимостей, а также динамического обновления графа (рис. 6). Эти алгоритмы позволят провести оперативную инвентаризацию сегментов ЕМСС, построить полную модель сети с учетом всех аспектов: физической топологии, логической структуры, сервисов и их зависимостей, а также текущей нагрузки и производительности.

Таким образом, применение интеллектуальных МАС для анализа защищаемой системы позволит собрать информацию о сегментах и элементах ЕМСС, об их размещении и взаимодействии, сетевом оборудовании, реализованных сервисах и службах, параметрах и об их состояниях, позволит выявить уязвимости системы, а также децентрализовать управление процессом сбора информации, распределить за счет этого ресурсозатраты между подсетями (объектами) ЕМСС и уменьшить время выполняемого процесса.

Список использованных источников

1. Концепция государственной системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак на информационные ресурсы Российской Федерации, утверждённая Президентом РФ 12 декабря 2014 года № К 1274. – URL: https://циткк.рф (дата обращения: 07.02.2026).

2. *Давыдов А. Е., Максимов Р. В., Савицкий О. К.* Безопасность ведомственных интегрированных инфокоммуникационных систем. – СПб. : НИИ «МАСШТАБ», 2011. – 192 с.

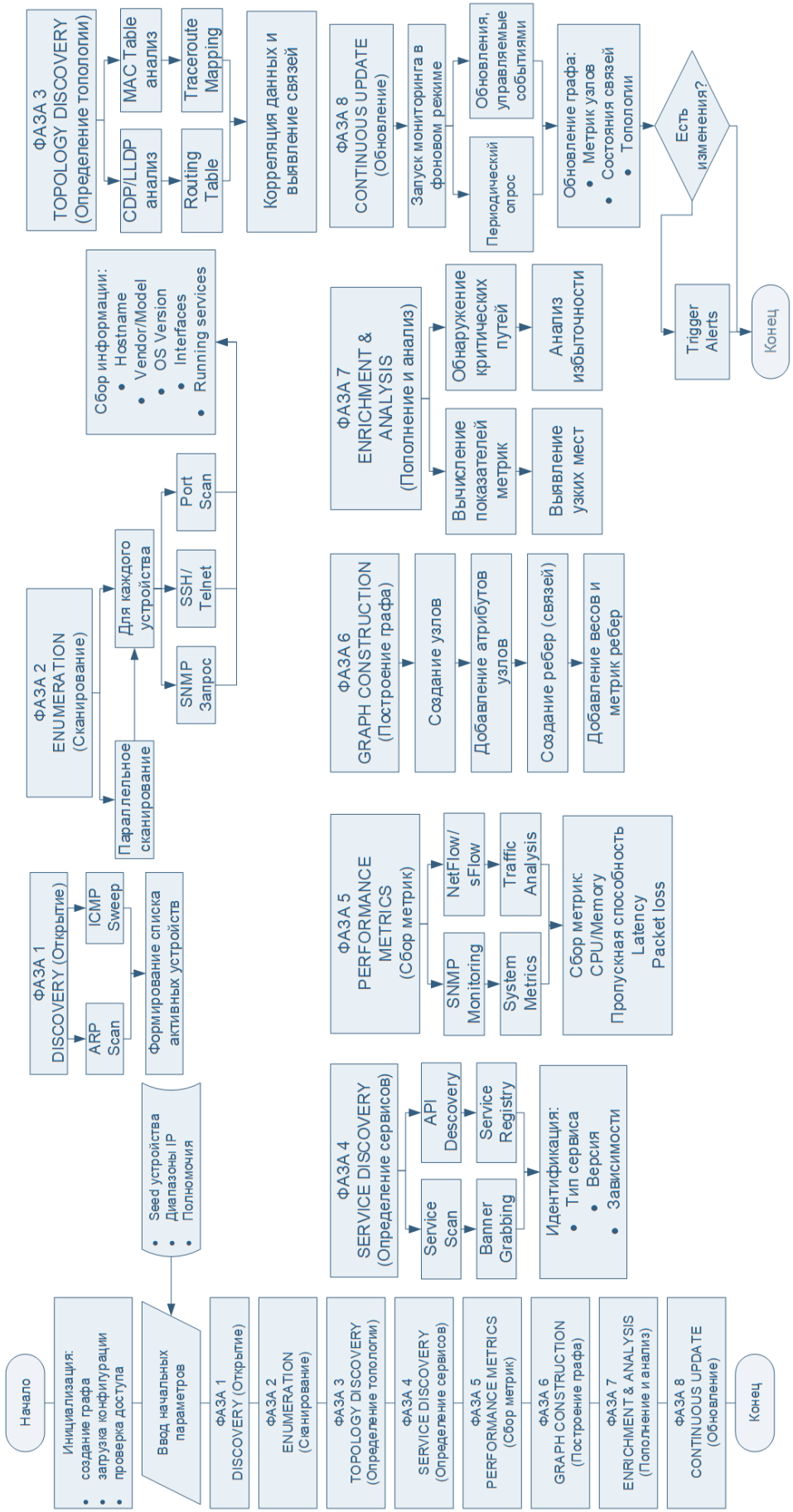


Рис. 6. Комплекс алгоритмов инвентаризации активов ЕМСС

3. Построение современных систем управления и обеспечение устойчивости их к компьютерным атакам / Е. О. Бухаров [и др.] // Актуальные направления развития систем охраны специальной связи и информации для нужд органов государственной власти РФ : сб. – Орёл : Академия ФСО России, 2021. – Ч. 4. – С. 55–58.

4. *Коцыняк М. А., Кулешов И. А., Лаута О. С.* Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей. – СПб. : Изд-во Политехн. у-та, 2013. – 93 с.

5. Прочитай и сделай: проводим сканирование сети самостоятельно // Блог компании Positive Technologies. – URL: www.habr.com. (дата обращения: 07.02.26).

6. *Третьяков Е. С.* Методология разработки самоорганизующихся мультиагентных информационно-аналитических систем по сбору и обработке данных : дисс. …канд. техн. наук. – М., 2020. – 128 с.

7. *Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.* Самоорганизация в мультиагентных системах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – Тематический выпуск 14. – С. 14–20.

И. А. Соловьев;
С. Ф. Стельмах,
кандидат военных наук

ФОРМАЛЬНЫЕ ПРАВИЛА И ПОРЯДОК РАСЧЕТА КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (ИНФОРМАТИЗАЦИИ)

Представлены уточнения формальных правил и порядка построения процесса определения значения комплексного показателя текущего состояния защищенности и защиты информации (обеспечения безопасности) объектов информационной инфраструктуры (информатизации) на основе расширенного перечня элементов производимой процедуры его детализированного расчета, а также состав и содержание используемых при этом входных параметров. Особенностью этих уточнений является их реализация в соответствии с предложениями по совершенствованию принятого регулятором (в области обеспечения безопасности объектов информационной инфраструктуры) методического подхода к оцениванию указанного показателя, формирование пакета которых осуществлялось в ходе общественных обсуждений специалистами проекта методики его оценки.

Ключевые слова: государственные органы (организации), информационные системы, объекты информационной инфраструктуры (информатизации), оценивание состояния защиты (обеспечения безопасности) информации, частные (групповые) показатели безопасности, комплексный показатель защищенности, минимальный (базовый) уровень защищенности, уровень защиты информации (обеспечения безопасности) объектов информатизации.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с документом [1] государственному регулятору в области обеспечения безопасности объектов информационной инфраструктуры определены расширенные полномочия по выполнению им функций централизованного отраслевого учета информационных систем, автоматизированных систем управления, информационно-телекоммуникационных сетей и иных объектов информатизации, включая отнесенные к критической информационной инфраструктуре, осуществления мониторинга текущего состояния технической защиты информации и обеспечения безопасности таких объектов, а также организации и проведения оценивания эффективности деятельности должностных лиц (структурных подразделений), на которых возложены полномочия (функции) по обеспечению информационной безопасности государственных органов управления и организаций, в том числе субъектов критической информационной инфраструктуры. В рамках реализации этих своих расширенных полномочий ФСТЭК России ввела в действие Методику оценки показателя состояния защиты информации и обеспечения безопасности объектов информатизации, подлежащих государственному контролю [2].

Методика разработана в целях обеспечения получения значений оценки степени достижения субъектами информационной инфраструктуры, органами государственной власти, государственными органами управления и организациями заданного регулятором минимально необходимого (базового) уровня защищенности значимых объектов информатизации от наиболее распространенных (типовых) угроз безопасности информации. Данный методический документ определяет порядок оценивания текущего состояния технической защиты информации (ЗИ), не содержащей сведения, составляющие государственную тайну, и обеспечения безопасности функционирования значимых объектов информатизации в указанных органах (организациях), подотчетных регулятору.

В соответствии с установленным порядком принятия решения к утверждению подобного рода документов ФСТЭК России предварительно инициировала процедуру проведения общественных обсуждений профильными специалистами проекта данной Методики [3] на предмет формирования обоснованных предложений по совершенствованию применяемого в нем методического подхода к оцениванию показателя текущего состояния ЗИ и обеспечения ее безопасности (ОБИ) для рассматриваемых объектов информатизации [4].

Представленный в статье [5] пакет предложений по совершенствованию методического подхода к оцениванию текущего состояния ЗИ (ОБИ) объектов информатизации в органе (организации), касающийся введения формальных выражений понятий индикатора состояния частных показателей безопасности и группового показателя компонента системы ЗИ (ОБИ), их смысловой и функциональной интерпретации, а также задания порядка применения этих элементов в расчете значения комплексного показателя защищенности с учетом приведенных разъяснений сути и правил нормализации используемых при этом констант, составляет необходимую фактуру решения задачи формализации процедуры определения текущих значений задаваемых показателей безопасности с расширением функциональных возможностей проводимого оценивания и анализа его практических результатов.

Предлагаемые механизм формализованного определения текущих оценок частных показателей безопасности посредством использования индикатора их состояния и порядок суммарного обобщения этих показателей значением группового показателя, характеризующего применительно к компоненту системы ЗИ (ОБИ) полноту выполнения всего состава требований связанной с ним группы частных показателей безопасности, позволяют при выполнении анализа получаемых результатов оценивания производить на основе этих оценок (значений) разноплановую детализацию причин несоответствия базовому уровню защищенности, а именно – в масштабе совокупности компонентов системы ЗИ (ОБИ), иначе групповых показателей (нереализованность каких-либо наборов необходимых мер), или в рамках каждой группы частных показателей безопасности (нереализованность каких-либо отдельных мер).

Вводимые на основе задаваемых Методикой нормализованных значений весовых коэффициентов групповых показателей, представляющих компоненты системы ЗИ (ОБИ), а также частных показателей безопасности понятия степени их соответственно «значимости» и «важности» обеспечивают возможность непосредственного (выражаемого числовым значением) определения как первоочередности (на уровне этих компонентов, групповых показателей), так и приоритетности (на уровне частных показателей безопасности) мер по выполнению требований базовой защищенности при принятии управленческих решений в части необходимости их реализации.

В общем случае представленные уточнения методического подхода к оцениванию текущего состояния ЗИ (ОБИ) образуют в своем формализованном виде расширенный функционал рассматриваемой Методики и в практической плоскости создают условия для построения соответствующего ему аппарата расчета показателя текущего состояния защищенности, а также обеспечения на его основе возможности реализации силами органов (организаций) процесса формирования результатов производимого оценивания, их анализа и выработки рекомендаций по планомерному достижению требуемого уровня защищенности от актуальных угроз безопасности в автоматизированном режиме.

Исходя из вышесказанного, представляемые в публикации необходимые уточнения формальных правил и порядка расчета комплексного показателя защищенности, отражающего текущее состояние ЗИ (ОБИ) объектов информационной инфраструктуры (информатизации) в подотчетных органах (организациях), являются актуальным решением задачи совершенствования принятого регулятором методического подхода к его оцениванию.

УТОЧНЕННЫЕ ПРАВИЛА РАСЧЕТА КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (ИНФОРМАТИЗАЦИИ) В ОРГАНЕ (ОРГАНИЗАЦИИ)

В качестве оцениваемого параметра, характеризующего текущее состояние ЗИ (ОБИ) значимых объектов информационной инфраструктуры (информатизации) в органе (организации), в Методике используется комплексный показатель текущего состояния защищенности $K_{ЗИ}$ (иначе – показатель защищенности $K_{ЗИ}$ или показатель $K_{ЗИ}$). Расчетное значение данного показателя определяет степень достижения органом (организацией) базового уровня ЗИ (ОБИ) таких объектов информатизации от типовых актуальных угроз безопасности информации (УБИ) в пределах установленного временного интервала оценивания, а также в имеющихся условиях эксплуатации применяемых ими информационных систем, автоматизированных систем управления, комплексов средств автоматизации, включая информационно-телекоммуникационные сети.

Информационные (автоматизированные) системы, автоматизированные системы управления, комплексы средств автоматизации, информационно-телекоммуникационные сети, отнесенные к значимым объектам информатизации, и содержащаяся в них информация органа (организации) имеют базовый (минимально необходимый) уровень защищенности от типовых актуальных УБИ, если получаемое расчетное значение показателя $K_{ЗИ}$ соответствует нормативно заданному ($K_{ЗИ} = 1$). Нормативное значение показателя $K_{ЗИ}$ характеризует реализацию мер по выполнению требований базового уровня защищенности в их полном объеме.

В общем случае показатель $K_{ЗИ}$ отражает полноту реализации принимаемых мер заданного состава, а его получаемые расчетные значения в рамках определенных экспертами ФСТЭК числовых промежутков принятой шкалы оценивания ($0{,}75 < K_{ЗИ} < 1$ или $K_{ЗИ} \le 0{,}75$) указывают на степень выполнения требований базового уровня защищенности и достигнутый при этом уровень ее текущего состояния. Такой состав необходимых к реализации мер (требований) задается совокупностью частных показателей безопасности, числовые выражения которых составляют набор входных параметров расчета данного показателя защищенности.

Согласно предложенной в статье [5] схеме соотнесения числовому выражению текущего состояния защищенности (показатель $K_{ЗИ}$), ставятся в соответствие качественная оценка (обозначение) и характеристика (показатель $K_{ИБ}$) диагностируемого в этом случае уровня ЗИ (ОБИ) для рассматриваемых объектов информатизации в правилах, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие расчетных значений показателя защищенности $K_{ЗИ}$ характеристикам показателя состояния защиты информации и обеспечения безопасности $K_{ИБ}$ от типовых актуальных угроз безопасности

№ п/п	Значение показателя $K_{ЗИ}$	Характеристика состояния защищенности и защиты информации (обеспечения безопасности)	Значение показателя $K_{ИБ}$
1	$K_{ЗИ} = 1$ (нормативное)	Обеспечивается минимальный необходимый уровень защиты от типовых актуальных УБИ. Уровень состояния защищенности и ЗИ (ОБИ) характеризуется как минимальный базовый	Минимальный базовый («зеленый»)
2	$0{,}75 < K_{ЗИ} < 1$ (нормируемое)	Минимальный необходимый уровень защиты от типовых актуальных УБИ не обеспечивается, имеются предпосылки к их реализации. Уровень состояния защищенности и ЗИ (ОБИ) характеризуется как низкий	Низкий («оранжевый»)
3	$K_{ЗИ} \le 0{,}75$ (нормируемое)	Минимальный необходимый уровень защиты от типовых актуальных УБИ не обеспечивается, имеется реальная возможность их реализации. Уровень состояния защищенности и ЗИ (ОБИ) характеризуется как критический	Критический («красный»)

В результате общая логическая последовательность получения количественного значения (числовой оценки) показателя $К_{ЗИ}$ на базе определяемых элементов его расчета в составе частных показателей безопасности k_{ji}, индикатора их состояния a_i, групповых показателей Gk_j (иначе показателей компонентов системы ЗИ (ОБИ) и (или) групп частных показателей безопасности) и весовых коэффициентов R_j в соответствии с указанным в статье [5] правилами обращения с ними имеет следующий вид:

$$\{k_{ji}\} \rightarrow (a_1 k_{j1} + a_2 k_{j2} + \ldots + a_i k_{ji}) \rightarrow \{Gk_j\} \rightarrow \\ \rightarrow (R_1 Gk_1 + R_2 Gk_2 + \ldots + R_j Gk_j) \rightarrow К_{ЗИ}. \quad (1)$$

В формуле (1) используются следующие обозначения: вычислительный статус элементов k_{ji}, R_j – константы расчета, значения которых задаются Методикой, a_i – переменная, значение которой устанавливается в процессе оценивания, $a_i k_{ji}$, Gk_j – расчетные значения (оценки) текущего состояния групп показателей, $R_j Gk_j$ – нормализованное в процессе расчета значение текущего состояния группового показателя, $К_{ЗИ}$ – целевое расчетное значение (целевая оценка) текущего состояния комплексного показателя.

Комплексность показателя $К_{ЗИ}$ задается предписанным Методикой порядком его расчета на основе всего множества значений частных показателей безопасности, группируемых в соответствии с представляемыми ими компонентами системы ЗИ (ОБИ) органа (организации), к числу которых ,согласно рассматриваемому методическому документу, относятся «Организация и управление», «Защита пользователей», «Защита информационных систем», «Мониторинг информационной безопасности и реагирование».

Исходя из представленного в статье [5] пакета уточнений методического подхода к оцениванию текущего состояния технической защиты информации (обеспечения безопасности) объектов информатизации в органе (организации), характеризуемого получаемым в ходе такого оценивания значением комплексного показателя текущего состояния их защищенности $К_{ЗИ}$, установленный состав элементов его расчета может быть определен в виде сводного перечня (карты описания) этих элементов (табл. 2).

Таблица 2

Перечень и карта описания элементов расчета комплексного показателя текущего состояния защищенности $К_{ЗИ}$

Обозначение элемента	Описание элемента расчета	Статус элемента в расчете
k_{ji}	Частный показатель безопасности (j – номер группы частных показателей или иначе компоненты системы ЗИ (ОБИ), i – порядковый номер частного показателя в группе)	Заданная константа расчета. Нормативное значение Методики
a_i	Индикатор состояния i-го частного показателя безопасности в рамках их группы принимает значение 1 для действительных (реализованных) или 0 для недействительных (нереализованных) показателей	Переменная. Значение устанавливается по результатам анализа исходных данных
$a_i k_{ji}$	Текущее значение i-го частного показателя безопасности в рамках j-й их группы принимает нормативное значение Методики для действительных (реализованных) или нулевое значение для недействительных (нереализованных) показателей	Расчетное значение (оценка) текущего состояния показателя
Gk_j	Групповой показатель [составной показатель текущего состояния j-й группы частных показателей безопасности или иначе обобщающий показатель текущего состояния оцениваемого j-го компонента системы ЗИ (ОБИ)]	Расчетное значение (оценка) текущего состояния показателя
R_j	Весовой коэффициент j-й группы частных показателей безопасности или иначе j-го компонента системы ЗИ (ОБИ)	Заданная константа расчета. Нормативное значение Методики
$R_j Gk_j$	Нормализованное значение текущего состояния j-го группового показателя для получения оценки текущего состояния показателя $К_{ЗИ}$ в пределах числового интервала [0, 1] заданной шкалы оценивания	Нормализованное значение текущего состояния показателя

В свою очередь, определение состава групп частных показателей безопасности оцениваемых компонентов системы ЗИ (ОБИ), содержания реализуемых мер (требований) базового уровня защищенности, отражаемых этими показателями, и задание соответствующих им числовых констант в нормализованных нормативных значениях как входных параметров производимого расчета $K_{ЗИ}$ осуществляются в рамках настоящей Методики посредством фиксируемого в обязательном порядке Перечня групповых и частных показателей безопасности, подлежащего оформлению в виде табл. 3, которая к ней прилагается.

В соответствии с общей последовательностью получения числовой оценки текущего состояния показателя $K_{ЗИ}$ на базе установленных выше элементов расчета его значения (1), а также картой их функционального описания, приведенной в табл. 2, в качестве результата рассмотренных уточнений содержание проводимого оценивания задается в правилах расчета оценки комплексного показателя защищенности объектов информатизации в органе (организации) путем поэтапного выполнения мероприятий и операций вычисления следующего состава:

а) сбор и анализ исходных данных (материалов), необходимых для получения оценки показателя $K_{ЗИ}$ (состав исходных данных проводимого оценивания, содержание и порядок реализации данных мероприятий устанавливаются отдельным разделом Методики);

б) определение значений текущего состояния частных показателей безопасности k_{ji} в рамках каждой их группы (осуществляется на основе установленных Методикой и указываемых в табл. 3 нормативных значений показателей k_{ji}, а также значений индикатора их текущего состояния a_i, назначаемых по результатам анализа исходных данных (материалов) проводимого оценивания);

в) расчет значений групповых показателей Gk_j (производится путем суммирования значений текущего состояния частных показателей безопасности k_{ji} в рамках каждой их группы, соответствующей оцениваемому компоненту системы ЗИ (ОБИ);

г) расчет значения показателя $K_{ЗИ}$ (производится путем суммирования расчетных значений групповых показателей Gk_j, предварительно нормализуемых соответствующими весовыми коэффициентами R_j, установленные Методикой нормативные значения которых указываются в табл. 3).

Таблица 3

Перечень групповых и частных показателей безопасности с определением соответствующих им числовых констант в нормализованных нормативных значениях

Групповой показатель (Gk_j)	Значение весового коэффициента группового показателя (R_j)	Частный показатель (k_{ji})	Значение частного показателя (k_{ji})
Gk_1 – компонент «Организация и управление»	0,10	k_{11} – на заместителя руководителя органа (организации) возложены полномочия ответственного лица за обеспечение информационной безопасности органа (организации), и определены его обязанности, подтверждается изданием соответствующего локального правового акта	0,30
		k_{12} – определены функции (обязанности) структурного подразделения (или отдельных работников), ответственного за обеспечение информационной безопасности органа (организации), подтверждается изданием соответствующего локального правового акта	0,40
		k_{13} – к подрядным организациям, имеющим доступ к информационным системам с привилегированными правами, в договорах установлены требования о реализации мер по защите от угроз через информационную инфраструктуру подрядчика или в случае, если подрядные организации не привлекаются	0,30

Продолжение табл. 3

Групповой показатель (Gk_j)	Значение весового коэффициента группового показателя (R_j)	Частный показатель (k_{ji})	Значение частного показателя (k_{ji})
Gk_2 – компонент «Защита пользователей»	0,25	k_{21} – отсутствуют учетные записи с паролем, сложность которого не соответствует установленным требованиям к парольной политике (в случае отсутствия технической возможности обеспечения требуемой сложности паролей реализованы компенсирующие меры)	0,30
		k_{22} – реализована многофакторная аутентификация привилегированных пользователей (при аутентификации не менее 50% администраторов, разработчиков или иных привилегированных пользователей используется 2-й фактор) или в случае отсутствия технической возможности реализации в информационной системе (в технических средствах) двухфакторной аутентификации	0,30
		k_{23} – отсутствуют учетные записи разработчиков и сервисные учетные записи с паролями, установленными ими по умолчанию	0,20
		k_{24} – отсутствуют активные учетные записи работников органа (организации) и работников, привлекаемых на договорной основе, с которыми прекращены трудовые или иные отношения	0,20
Gk_3 – компонент «Защита информационных систем»	0,35	k_{31} – на сетевом периметре информационных систем установлены межсетевые экраны уровня L3/L4 (доступ к 100% интерфейсов, доступных из сети Интернет, контролируется межсетевыми экранами уровня L3/L4) или в случае отсутствия в информационных системах устройств, интерфейсов, взаимодействующих с сетью Интернет	0,20
		k_{32} – на устройствах и интерфейсах, доступных из сети Интернет, отсутствуют уязвимости критического уровня опасности с датой публикации обновлений (компенсирующих мер по устранению) в банке данных угроз ФСТЭК России, на официальных сайтах разработчиков, в иных открытых источниках более 30 дней, или в отношении таких уязвимостей реализованы компенсирующие меры	0,20
		k_{33} – на пользовательских устройствах и серверах отсутствуют уязвимости критического уровня с датой публикации обновления (компенсирующих мер по устранению) более 90 дней (не менее 90% устройств и серверов), или в отношении таких уязвимостей реализованы компенсирующие меры	0,10
		k_{34} – обеспечен документальный или автоматизированный учет пользовательских устройств, серверов и сетевых устройств [не менее 80% устройств и серверов учтено в документах (ведомостях, паспортах, эксплуатационной документации) или в автоматизированных системах (CMDB)]	0,10
Gk_3 – компонент «Защита информационных систем»	0,35	k_{35} – обеспечена проверка вложений в электронных письмах электронной почты на наличие вредоносного программного обеспечения (проверяются вложения не менее чем на 80% пользовательских устройств) или если в информационных системах органа (организации) не используется электронная почта	0,15

Окончание табл. 3

Групповой показатель (Gk_j)	Значение весового коэффициента группового показателя (R_j)	Частный показатель (k_{ji})	Значение частного показателя (k_{ji})
Gk_3 – компонент «Защита информационных систем»	0,35	k_{36} – обеспечено централизованное управление средствами антивирусной защиты (не менее чем 80% пользовательских устройств контролируется средствами антивирусной защиты с централизованным управлением), и при этом обеспечены контроль и установка обновлений баз данных признаков вредоносного программного обеспечения не реже чем 1 раз в месяц или в случае использования в органе (организации) автономных рабочих мест с установленными на них автономными средствами антивирусной защиты (тип «Г»), и при этом обеспечены контроль и установка обновлений баз данных признаков вредоносного программного обеспечения не реже чем 1 раз в месяц или в случае использования в органе (организации) информационных систем, содержащих пользовательские устройства, в которых конструктивно отсутствуют интерфейсы для возможного внедрения вредоносного программного обеспечения	0,15
		k_{37} – реализована очистка входящего из сети Интернет сетевого трафика от аномалий на уровне L3/L4 (заключен договор с провайдером) или если в информационных системах органа (организации) отсутствуют веб-сайт либо иные сервисы, подверженные DDos-атакам	0,10
Gk_4 – компонент «Мониторинг информационной безопасности и реагирование»	0,30	k_{41} – реализованы централизованный сбор событий безопасности и оповещение о неудачных попытках входа для привилегированных учетных записей	0,10
		k_{42} – реализованы централизованный сбор и анализ событий безопасности на всех устройствах, взаимодействующих с сетью Интернет	0,40
		k_{43} – утвержден документ, определяющий порядок реагирования на компьютерные инциденты	0,35

Определение значений текущего состояния частных показателей безопасности k_{ji} осуществляется применительно к их j-й группе (оцениваемому компоненту) посредством использования конструкции множителей $a_i k_{ji}$, где k_{ji} – нормативное значение реализованного (действительного) показателя, a_i – индикатор его состояния, значение которого устанавливается по результатам анализа исходных данных (материалов) оценивания на предмет реализации отражаемых этим показателем необходимых мер (требований) базового уровня защищенности, а именно $a_i = 1$ при положительном заключении (показатель достигнут (реализован), является действительным) или $a_i = 0$ – в противном случае. При этом индексом j обозначается номер группы (компонента) принадлежности показателя, а индексом i – его порядковый номер в этой группе.

Расчет значения группового показателя Gk_j производится на основе установленных текущих значений частных показателей безопасности $a_i k_{ji}$ путем их суммирования в рамках j-й группы принадлежности k_{ji} к оцениваемому компоненту системы ЗИ (ОБИ), что соответствует конструкции ($a_1 k_{j1} + a_2 k_{j2} + \ldots + a_i k_{ji}$) и в общем виде описывается следующим выражением:

$$Gk_j = \sum_i a_i k_{ji} . \qquad (2)$$

Расчет значения показателя $K_{ЗИ}$ реализуется посредством суммирования расчетных значений всего состава групповых показателей Gk_j, нормализуемых соответствующими им весовыми коэффициентами R_j в своих заданных нормативных значениях $R_j\,Gk_j$, что согласуется соответствующей конструкцией вида ($R_1\,Gk_1 + R_2\,Gk_2 + \ldots + R_j\,Gk_j$) и обобщенно представляется следующим выражением:

$$K_{ЗИ} = \sum_j R_j\,Gk_j\,. \qquad (3)$$

Комплексирование выражений (1) и (2), представляющих собой различные уровни детализации расчета показателя состояния защищенности, осуществляемого на основе текущих значений частных показателей безопасности k_{ji}, формирует в итоге целостную универсальную формулу определения числового значения комплексного показателя текущего состояния защищенности (показатель $K_{ЗИ}$) в объеме установленных правил уточненного методического подхода к проводимому оцениванию, а именно

$$K_{ЗИ} = \sum_j R_j \sum_i a_i\,k_{ji}\,. \qquad (4)$$

Полученное таким образом расчетное значение показателя $K_{ЗИ}$ подлежит сравнению с минимальным и максимальным (нормативным) пороговыми значениями шкалы его оценивания, по результатам которого выявляется достигнутый органом (организацией) уровень защищенности эксплуатируемых им объектов информатизации. На основании соответствия значения показателя $K_{ЗИ}$ характеристикам показателя $K_{ИБ}$ (табл. 1) производится определение текущего состояния ЗИ (ОБИ) от типовых актуальных угроз в подотчетном регулятору органе (организации).

УТОЧНЕННЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (ИНФОРМАТИЗАЦИИ) В ОРГАНЕ (ОРГАНИЗАЦИИ)

Исходя из вышесказанного на рис. 1 представлена структурно-функциональная схема построения процесса детализированного расчета (определения) значения показателя $K_{ЗИ}$ ($K_{ИБ}$) и получения итоговых оценок достигаемого при этом уровня текущего состояния защищенности объектов информатизации, а также ЗИ (ОБИ) от типовых актуальных угроз в органе (организации).

Для расчета (определения) значения показателя $K_{ЗИ}$ ($K_{ИБ}$) и получения в конечном счете итоговых оценок достигаемого при этом органом (организацией) уровня текущего состояния защищенности эксплуатируемых объектов информатизации и ЗИ (ОБИ) от типовых актуальных УБИ в качестве исходных данных (материалов) используются:

а) документы отчетного характера (протоколы, акты), составленные по результатам государственного контроля, внешней оценки (аудита) соответствия в области защиты (обеспечения безопасности) информации, а также внутреннего контроля уровня защищенности значимых объектов информатизации, мониторинга их информационной безопасности, в том числе аттестации информационных систем и иных мероприятий по изучению состояния ЗИ (ОБИ) в органе (организации);

б) внутренние организационно-распорядительные документы, регламентирующие организацию ЗИ (ОБИ) значимых объектов информатизации в органе (организации), а также эксплу-

атационная документация на применяемые средства ЗИ, содержащая сведения об их настройках и конфигурации;

в) результаты проведения инвентаризации информационных систем и опроса (интервьюирования) работников органа (организации) о выполнении ими задач (функций) с использованием средств автоматизации и (или) по обеспечению защиты (безопасности) информации;

г) результаты анализа функционирования (применения) отдельных программных, программно-аппаратных средств информационных систем органа (организации), в том числе средств ЗИ, инвентаризации информационных систем, инструментальных средств оценки защищенности и (или) мониторинга информационной безопасности.

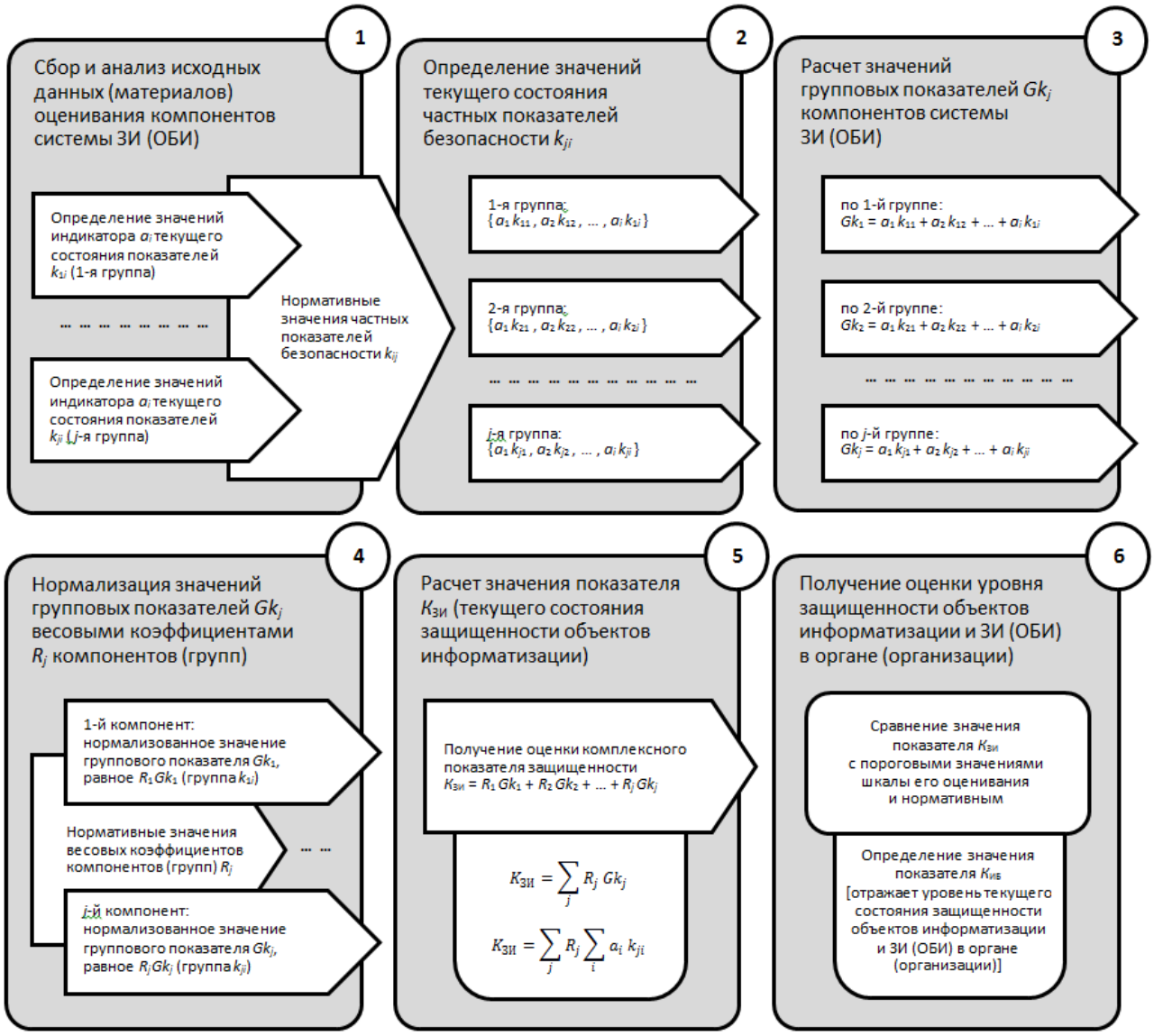


Рис. 1. Структурно-функциональная схема построения процесса расчета (определения) значения показателя $K_{ЗИ}$ ($K_{ИБ}$) и получения оценок уровня текущего состояния защищенности и ЗИ (ОБИ) в органе (организации)

Определение значений текущего состояния частных показателей безопасности k_{ji} осуществляется специалистами, проводившими сбор и анализ исходных данных (материалов) оценивания, и предусматривает в зависимости от значения индикатора их состояния $a_i = \{0, 1\}$ присвоение им соответственно значения равного 0 (исключение из последующего расчета показателя

$К_{ЗИ}$) или нормативных значений (см. табл. 3). При этом данным индикатором отражается результат подтверждения вывода о реализации определяемых показателем k_{ji} отдельных мер (требований) базового уровня защищенности объектов информатизации и их достаточности для блокирования (нейтрализации) типовых актуальных угроз безопасности информации.

Расчет текущего значения показателя $К_{ЗИ}$ может производиться в объеме значений индексов j и i как пошаговой последовательностью применения выражений (2) и (3), осуществляя тем самым фиксацию показателем Gk_j промежуточных результатов проводимого оценивания на уровне отдельных компонентов системы ЗИ (ОБИ) или иначе групп частных показателей безопасности, так и в целом за счет использования формулы (4) обобщенного вида. Формализованный таким образом аппарат определения значения показателя $К_{ЗИ}$, отражая функциональную зависимость заданных элементов его расчета (см. табл. 2) и учитывая содержательный и количественный состав входных параметров производимого оценивания (табл. 3) посредством соответствующего их индексирования, носит универсальный характер и проявляет свойство неизменности в отношении возможного (обоснованно необходимого) расширения числа рассматриваемых Методикой компонентов системы ЗИ (ОБИ) и (или) реализуемых мер (требований) базового уровня защищенности.

Примером такого возможного расширения может служить обоснование необходимости учета Методикой базового состава мер по обеспечению безопасности для значимых объектов критической информационной инфраструктуры, предписываемых к реализации требованиями приказа ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239. В данном документе предполагается как минимум больший перечень подлежащих контролю компонентов системы ЗИ (ОБИ), чем рассматриваемый в рамках настоящей Методики, при этом каждый из этих компонентов снабжен своей многочисленной группой показателей безопасности в различных вариантах их состава применительно к установленным категориям значимости таких объектов. А именно приложением к данному приказу по факту определены 17 контролируемых компонентов системы ЗИ (ОБИ), и, в частности, для компонента «Защита информационной (автоматизированной) системы и ее элементов» предполагается реализация базовых мер по обеспечению безопасности таких объектов, отражаемая показателями ЗИС.ХХ, по первой категории их значимости в объеме, равном 20 показателям такого типа, второй – 19 и третьей – 15.

Однако на практике Методикой заданы лишь четыре группы частных показателей безопасности k_{ji}, согласуемых по индексу номера группы j в соответственном порядке его значений {1, 2, 3, 4} с компонентами системы ЗИ (ОБИ) «Организация и управление», «Защита пользователей», «Защита информационных систем» и «Мониторинг информационной безопасности и реагирование», оцениваемыми на предмет их соответствия установленным требованиям базового уровня защищенности.

В каждой группе таких показателей, которые характеризуют реализацию отдельных мер (требований) базового уровня защищенности от типовых актуальных угроз, указан собственный их набор в соотношении: первая группа в составе трех частных показателей безопасности k_{ji}, вторая – четырех, третья – семи и четвертая – трех. В этой связи, согласно указанному соотношению, индекс порядкового номера показателя в их группе i получает соответственно целочисленные значения в пределах числовых интервалов: [1, 3], [1, 4], [1, 7], [1, 3].

Следовательно, общая формула расчета значения комплексного показателя текущего состояния защищенности $К_{ЗИ}$ (4) применительно к заданному численному и содержательному составу входных параметров производимого оценивания (табл. 3) объективно принимает следующий конечный вид:

$$\begin{aligned} К_{ЗИ} = {} & R_1 (a_1 k_{11} + a_2 k_{12} + a_3 k_{13}) + R_2 (a_1 k_{21} + a_2 k_{22} + a_3 k_{23} + a_4 k_{24}) + \\ & + R_3 (a_1 k_{31} + a_2 k_{32} + a_3 k_{33} + a_4 k_{34} + a_5 k_{35} + a_6 k_{36} + a_7 k_{37}) + \\ & + R_4 (a_1 k_{41} + a_2 k_{42} + a_3 k_{43}). \end{aligned} \quad (5)$$

Полученная согласно выражению (5) числовая величина расчета показателя защищенности $K_{ЗИ}$ сравнивается с пороговыми значениями шкалы его оценивания, в том числе с нормативным, определяющим условие достижения базового уровня защищенности. На основе результатов сравнения формируются выводы (см. табл. 1) о текущем состоянии (уровне) защищенности объектов информатизации, а также защиты информации (обеспечения безопасности) в органе (организации), отражаемые соответствующим значением показателя $K_{ИБ}$.

В случае, если по результатам расчета получено значение показателя $K_{ИБ}$, характеризующее текущее состояние ЗИ (ОБИ) в органе (организации) как низкое («оранжевый») или критическое («красный»), разрабатывается план реализации мероприятий по достижению следующего уровня защиты от актуальных УБИ, предусматривающий их выполнение в сроки, не превышающие временной интервал проведения очередной плановой оценки показателя $K_{ЗИ}$ ($К_{ИБ}$).

О полученном по результатам расчета значении показателя $K_{ЗИ}$, не соответствующем его нормативному значению ($K_{ЗИ} \neq 1$), информируется руководитель органа (организации) для принятия решения о необходимости выполнения комплекса мероприятий по достижению базового уровня защищенности эксплуатируемых объектов информатизации и дальнейшему совершенствованию в органе (организации) системы ЗИ (ОБИ). В этом случае на основании полученных значений текущего состояния частных показателей k_{ji} определяются состав мер по ЗИ (ОБИ) объектов информатизации, которые не реализованы или реализация которых не обеспечивает защиту от типовых актуальных УБИ, первоочередность и приоритетность их принятия в заданные Методикой сроки, а также планируются мероприятия по совершенствованию системы ЗИ (ОБИ) в целом согласно установленным в органе (организации) целям защиты (обеспечения безопасности) информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках реализации предложений по совершенствованию методического подхода регулятора к оцениванию текущего состояния ЗИ (ОБИ) объектов информационной инфраструктуры (информатизации) приведенные выше уточненные правила и порядок расчета комплексного показателя текущего состояния их защищенности (КЗИ) образуют в своем формализованном виде расширенный функционал рассматриваемой Методики и в практической плоскости представляют собой математически корректный аппарат получения оценок уровня текущего состояния защищенности и ЗИ (ОБИ) в органе (организации).

Данный расчетный аппарат обеспечивает возможности построения силами органов (организаций) процесса автоматизированного формирования детализированных результатов производимого оценивания, их анализа и выработки продуктивных рекомендаций по планомерному достижению ими требуемого регулятором уровня защищенности эксплуатируемых объектов информатизации от актуальных УБИ.

Полученное в соответствии с настоящими уточнениями значение показателя защищенности $K_{ЗИ}$ является объективным критерием принятия в органе (организации) обоснованных управленческих решений в части как необходимости, так и приоритетности реализации первоочередных мер по ЗИ (ОБИ) объектов информатизации, поскольку его несоответствие заданному нормативному значению указывает на наличие в органе (организации) возможности реализации актуальных УБИ или предпосылок для их реализации.

Вместе с тем положительная динамика изменения получаемых значений показателя $K_{ЗИ}$ в рамках заданной Методикой периодичности проведения оценивания, равно как и ее отсутствие, характеризует эффективность деятельности должностных лиц (структурных подразделений), осуществляющих выполнение функций по обеспечению информационной безопасности органа (организации). Деградация результатов оценивания текущего состояния защи-

щенности эксплуатируемых объектов информатизации трактуется как неспособность этих профильных должностных лиц (структурных подразделений) с необходимой результативностью выполнять задачи по предназначению в части достижения в кратчайшие сроки органом (организацией) требуемого регулятором уровня защиты информации (обеспечения безопасности), соответствующего оценке его качественного показателя $К_{ИБ}$, обозначаемой Методикой как «минимальный базовый» («зеленый»).

Дефицит времени для решения органами (организациями) задачи реализации мер (требований) минимально необходимого (базового) уровня защищенности и ЗИ (ОБИ) объектов информационной инфраструктуры (информатизации) от типовых актуальных УБИ обусловлен вводимым с начала 2025 г. запретом на использование средств ЗИ, странами происхождения которых являются иностранные государства, совершающие в отношении Российской Федерации, российских юридических и физических лиц недружественные действия, либо производителями которых являются организации, находящиеся под юрисдикцией таких иностранных государств, прямо или косвенно подконтрольных им либо аффилированных с ними, а также пользование сервисами (работами, услугами) по обеспечению информационной безопасности, предоставляемыми (выполняемыми, оказываемыми) этими организациями.

Следовательно, в условиях действия указанных ограничений качество текущего состояния ЗИ (ОБИ) органа (организации) предопределяется применением аппаратно-программных (программных) средств информационных систем согласно установленным правилам принятой политики безопасности, оснащенностью сертифицированными средствами ЗИ отечественного производства, включая инструментальные средства инвентаризации, оценки защищенности и (или) мониторинга информационной безопасности. Кроме того, требуемое качество текущего состояния ЗИ (ОБИ) органа (организации) достигается наличием у его профильных специалистов необходимых компетенций по реализации базовых мер обеспечения защиты (безопасности) информации, адаптации их набора в соответствии с имеющимися УБИ, применяемыми информационными технологиями и особенностями функционирования объектов информатизации, а также способностью этих специалистов к принятию при недостаточности адаптированного набора дополнительных мер блокирования (нейтрализации) всего состава выявляемых УБИ, разработке и внедрению в случае необходимости компенсирующих мер, осуществление которых обеспечивает требуемый уровень защищенности объектов эксплуатации информационной инфраструктуры.

В связи с вышесказанным для обеспечения возможности полноценного оценивания способности органов (организаций) к выполнению задач по достижению как минимально необходимого (базового) уровня защищенности и ЗИ (ОБИ) объектов информационной инфраструктуры (информатизации) от типовых актуальных угроз безопасности информации, так и последующего расширенного базового или иного более высокого уровня защищенности, характеризуемого реализацией комплекса дополнительных «усиленных» мер (требований), а также готовности органов (организаций) к планомерному проведению мероприятий качественно прогрессирующего совершенствования системы ЗИ (ОБИ) с целью повышения ее эффективности ФСТЭК России требуется в пределах своей компетенции осуществить разработку методического документа «Методика оценки зрелости деятельности в области защиты информации (обеспечения безопасности) значимых объектов информатизации» и представить в ближайшее время его проект на общественное обсуждение профильными специалистами.

Список использованных источников

1. О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 16 августа 2004 г. № 1085 «Вопросы Федеральной службы по техническому и экспортному контролю» и в Положение, утвержденное этим Указом : Указ Президента Российской Федерации от 8 ноября

2023 г. № 846. – URL: https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311080017 (дата обращения: 21.04.2025).

2. Методика оценки показателя состояния защиты информации и обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : методический документ / ФСТЭК России : [утв. ФСТЭК России 2 мая 2024 г.]. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument (дата обращения: 21.04.2025).

3. Методика оценки показателя состояния защиты информации и обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (проект) : методический документ / ФСТЭК России. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/proekty (дата обращения: 14.02.2024).

4. *Бондаренко С. В.* О методическом подходе к оценке текущего состояния защиты информации и обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры в органах государственной власти и организациях : доклад // Международный форум «Технологии и безопасность». 13–15 февраля 2024 г. / ФСТЭК России. – URL: https://tbforum.ru/ hubfs/Digital/ss/ss_adapt (дата обращения: 24.04.2025).

5. *Соловьев И. А., Стельмах С. Ф.* Методический подход к оцениванию комплексного показателя текущего состояния защиты информации (обеспечения безопасности) объектов информационной инфраструктуры (информатизации) // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2025. – Вып. 698. – С. 259–268.

А. А. Абдурахимов,
доктор технических наук, профессор;
А. М. Денисов,
доктор технических наук, доцент;
И. Ю. Нечаев,
кандидат технических наук

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОРБИТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

В статье представлена методика обоснования параметров многоспутниковой орбитальной группировки на основе комплексного (совместного) проектирования баллистической структуры орбитальной группировки и параметров входящих в ее состав малых космических аппаратов по критерию минимума стоимости. Приведены примеры расчетов параметров многоспутниковых орбитальных группировок космической системы связи на базе малых космических аппаратов, демонстрирующие закономерности изменения затрат на построение орбитального сегмента космической системы в зависимости от выбора высоты орбиты.

Ключевые слова: малый космический аппарат, баллистическая структура, многоспутниковая орбитальная группировка.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании многоспутниковой орбитальной группировки (ОГ) малых космических аппаратов (МКА) космической системы связи (КСС) возникает проблема обоснования параметров ее орбитального построения (ОП), связанная в первую очередь с выбором высоты размещения ОГ и обусловленная рядом существующих противоречий.

С одной стороны, с ростом высоты орбиты увеличивается угол землеобзора отдельных МКА и орбитальная группировка (например, для зонального обслуживания) может быть построена с меньшим количеством МКА. Однако каждый аппарат при этом должен обслуживать большее количество абонентов, находящихся на большем удалении от МКА. Вследствие этого для обеспечения возросшей требуемой пропускной способности канала связи «МКА – абонент» потребуется увеличение мощности целевой системы (ЦС), что приведет к росту массы МКА. Кроме того, повышение высоты орбиты в направлении верхней границы диапазона низких околоземных орбит приведет к увеличению плотности потоков корпускулярной радиации, что также потребует дополнительных затрат массы на защиту и резервирование бортовой аппаратуры МКА.

С другой стороны, на низких орбитах существенно увеличивается количество МКА в составе ОГ, но каждый МКА становится легче, существенно снижаются и затраты на выведение отдельных МКА на более низкие орбиты. Однако и на низких орбитах присутствует фактор, способствующий увеличению массы МКА, – аэродинамическое сопротивление, преодоление которого требует наличия на борту дополнительных запасов рабочего тела для двигательной установки, растущих пропорционально сроку летной эксплуатации аппарата [3, 4].

Таким образом, затраты на создание многоспутниковой орбитальной группировки, складывающиеся из затрат на создание нужного количества МКА, выведение их на орбиты, а также на их эксплуатацию в течение заданного срока, нельзя заранее однозначно связать ни с количеством МКА в составе ОГ, ни с массой самих МКА, ни с затратами на их выведение, а задачу выбора орбитальной структуры (ОС) космической системы следует решать с учетом проектных параметров МКА, различных, в общем случае, для всех вариантов ОС.

Очевидно, что выбор ОС и параметров МКА космической системы связи представляет собой оптимизационную задачу, при решении которой в качестве обобщенного показателя качества системы может рассматриваться стоимость создания и эксплуатации ОГ МКА при условии выполнения требований потребителя по объему и качеству предоставляемых услуг связи. Формализованно задача может быть представлена записью

$$b^*_{\text{ОГ}} = \arg \min_{b_{\text{ОГ}} \in B_{\text{ОГ}}} (C_{\text{ОГ}}(b_{\text{ОГ}}) | R^{\text{ТР}} \subset R \wedge q \in Q^{\text{ТР}}), \quad (1)$$

где $b_{\text{ОГ}}$ – вариант построения ОГ космической системы, определяемый векторами: $k_{\text{ОГ}}$ – вектором параметров ОС космической системы, $b_{\text{МКА}}$ – вектором проектных параметров МКА, $b_{\text{ОГ}} = \langle k_{\text{ОГ}}, b_{\text{МКА}} \rangle$;

$B_{\text{ОГ}}$ – множество вариантов построения ОГ;

$C_{\text{ОГ}}$ – стоимость создания и эксплуатации ОГ МКА;

$R^{\text{ТР}}$ – регион, в котором размещены все абоненты космической системы;

R – регион обслуживания космической системой;

q – вектор, характеризующий объем и качество предоставляемых системой услуг связи;

$Q^{\text{ТР}}$ – множество, определяющее требования потребителя к объему и качеству предоставляемых космической системой услуг связи.

Для решения сформулированной задачи с целью исследования закономерностей, проектирования многоспутниковой группировки, а также обоснования выбора ее предварительных параметров на ранних этапах проектирования в статье предложена методика выбора ОС и обоснования параметров МКА КСС на основе ОГ, построенной на круговых орбитах одной высоты для всех МКА. Введенное ограничение позволяет в качестве единственного варьируемого параметра выбрать высоту орбит МКА, определяющую как параметры ОС системы, так и облик составляющих ее МКА. Полные затраты ресурсов будут зависеть еще и от выбора космодрома, средств и схем выведения МКА, которые также могут быть рассчитаны индивидуально для каждого варианта ОС и соответствующего облика МКА.

СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОРБИТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Структура методики описывается схемой, представленной на рис. 1.

На первом этапе осуществляется подготовка исходных данных для обоснования параметров ОГ. В соответствии с постановкой задачи (1) основу исходных данных составляет модель абонента системы связи [1]

$$M_{\text{аб}}: \{V_{\text{аб}}, P_{\text{аб}}(\hat{\psi}, \hat{\lambda})\}_{\langle N_{\text{аб}} \rangle}, \quad (2)$$

где $V_{\text{аб}}$ – заданная пропускная способность канала связи «МКА – абонент»;

$P_{\text{аб}}$ – требуемая энергетическая характеристика канала связи;

$\hat{\psi}, \hat{\lambda}$ – геодезические координаты абонента на поверхности Земли с плотностью распределения $\varphi_{\text{аб}}(\psi, \lambda)$;

$N_{\text{аб}}$ – количество абонентов в регионе.

В предложенной модели [1] принято, что все потребители системы предъявляют одинаковые требования к объему и качеству связи. Тогда вектор требований к системе принимает вид

$$q = \langle V_{\text{АБ}}, P_{\text{АБ}}, N_{\text{АБ}} \rangle. \quad (3)$$

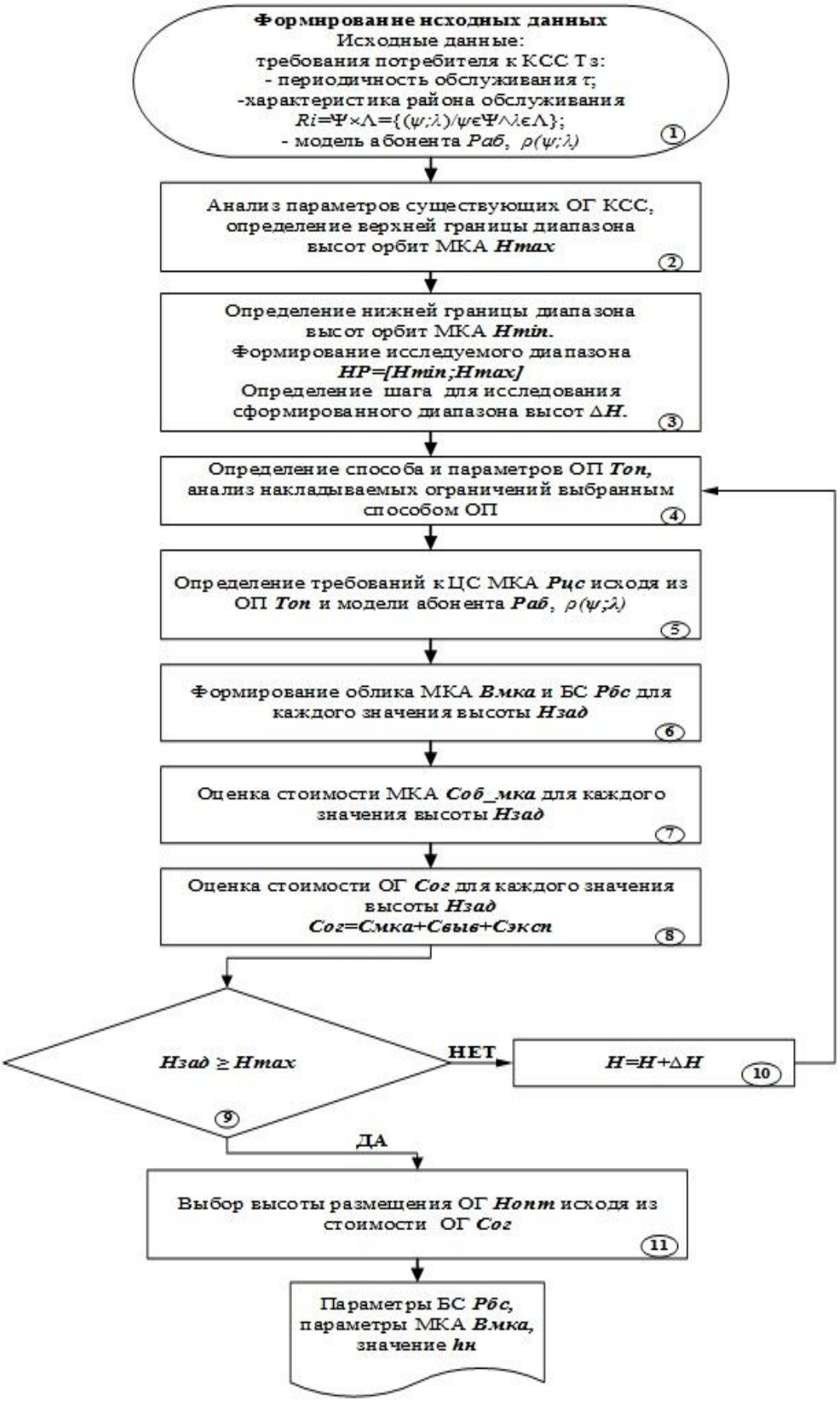


Рис. 1. Общая структура методики

Для описания абонента системы подвижной персональной спутниковой связи в методике рекомендуется использовать две формы представления групп абонентов: либо случайным равномерным распределением по площади в пределах прямоугольного региона, либо нормальным распределением относительно заданного геодезическими координатами центра в пределах региона, ограниченного окружностью. Статистическая модель абонента, особенности и принятые при ее использовании допущения достаточно подробно описаны в работе [1].

Распределение потребителей на поверхности планеты определяет и регион обслуживания космической системы, включающий в себя все места расположения наземных потребителей:

$$R^{\text{ТР}} = \Psi \times \Lambda = \{(\psi, \lambda) | \psi \in \Psi \wedge \lambda \in \Lambda\}, \quad (4)$$

где Ψ и Λ – множества всех значений географической широты и долготы региона.

Важной задачей методики является определение верхней границы рассматриваемого диапазона высот орбит для размещения ОГ КСС. Верхняя граница определяется на основе анализа условий функционирования КА и технических возможностей целевого оборудования, используемого на современных КА. Проведенные в этом направлении исследования [2–6], а также опыт эксплуатации современных низкоорбитальных КС связи (например, от разработчиков *OneWeb* и *SpaceX*) [7, 8] дают основания рекомендовать выбор верхней границы диапазона высот орбит в 2000 км.

Нижняя граница $h_{\min}$ рассчитывается, исходя из минимального срока активного существования $T_{\min}$ и максимального баллистического коэффициента МКА с учетом ограничения запаса рабочего тела на коррекцию орбиты МКА, $h_{\min} = f(T_{\min}, \mathrm{C}_{\max})$. Анализ возможностей размещения МКА на низких орбитах показывает нецелесообразность выбора для МКА связи круговых орбит ниже 300 км.

Учитывая сказанное, верхняя граница $h_{\max}$, как правило, определяется перед началом моделирования, нижняя – может уточняться с учетом конкретного облика (и соответствующих ему массогабаритных характеристик) во внутренних циклах поиска в целях уменьшения мощности множества независимых переменных.

При заданных параметрах расположения абонентов и требованиях по периодичности обслуживания может быть выбрана ОС для заданного варианта высоты орбиты. Для этого разработаны различные способы. Известно, что все существующие классы ОС, с точки зрения поставленной потребителем задачи, можно разделить на три группы по части наблюдаемой поверхности Земли, и каждую из этих групп можно разделить еще на две группы по периодичности наблюдения. Классы ОС для обслуживания заданного региона Земли делятся на три группы: ОС глобального обслуживания, ОС зонального обслуживания и ОС регионального обслуживания. По периодичности обслуживания варианты ОС делятся на структуры, обеспечивающие непрерывный обзор и периодический обзор (обзор с разрывами). Из перечисленных вариантов выбираются те, которые наиболее подходят для построения ОГ по заданным требованиям потребителя (район и периодичность обслуживания R_i и $\tau_{\text{обсл}}$). Большинство существующих сегодня космических систем подвижной персональной спутниковой связи относятся к категории систем непрерывного зонального или регионального обслуживания. В качестве подходящих структур для построения таких систем в методике предлагается рассматривать кинематически правильные системы (КПС) и структуры «цепочки» [5, 12]. В общем случае для обоснования параметров ОГ могут использоваться и любые другие подходящие классы ОС.

Необходимо упомянуть, что принципиально указанные схемы построения различаются тем, что при формировании ОС по способу «цепочки» структура строится на основе того, что зона радиовидимости одного МКА является постоянной. Исходя из этого выстраиваются звенья «цепочки», а также участки многократного перекрытия. КПС основана на первоначальном формировании полос обзора с последующим построением системы на их основе. Каждый из классов ОС в общем случае будет давать разное требуемое минимальное количество МКА в составе ОГ на выбранной высоте. При этом на разных высотах в пределах всего

рассматриваемого диапазона, вероятно, не будет структуры, всегда дающей результат с минимальным количеством МКА. В качестве примера на рис. 2 показаны результаты расчета количества МКА для непрерывного обслуживания одного и того же региона в ОГ построенными на двух классах ОС. Поэтому при окончательном выборе класса ОС для каждого значения высоты в пределах от h_1 до h_2 необходимо оценивать количество МКА и выбирать тот класс ОС, в котором это количество будет минимальным.

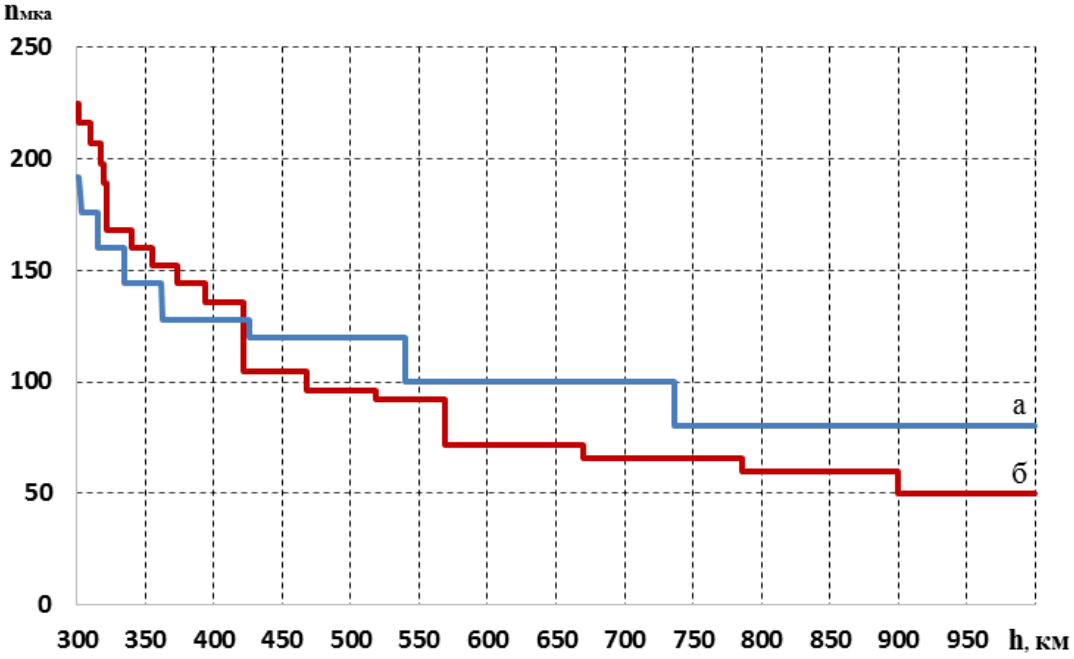


Рис. 2. Зависимость потребного количества малых космических аппаратов в орбитальной группировке от высоты орбиты: кривая а – кинематические правильные системы; кривая б – структуры «цепочек»

Вместе с тем на выбор ОС будут влиять и ограничения, присущие каждому из рассматриваемых классов. Анализируя рассматриваемые классы ОС с точки зрения ограничений, (например: по требуемому количеству пусков РКН, по необходимой конструкции разгонного блока или количеству МКА, выводимых каждой РКН), можно установить, что ограничений, одновременно свойственных всем рассматриваемым способам, нет, поскольку эти ограничения определяются индивидуально для каждого конкретного случая построения орбитальной структуры и, в том числе, зависят от выбранной ракеты-носителя, космодрома запуска и других частных параметров. Исключения будут составлять ограничения, накладываемые требуемым регионом обслуживания R_i и особенностями БС: для всех рассмотренных способов характерно следующее: суммарное значение наклонения орбит $i_{раб}$ и угла землеобзора $\varphi_з$ должно быть больше, чем верхняя широта региона обслуживания $\psi_в$ (в случае глобального обзора – 90 градусов):

$$i_{раб} + \varphi_з > \psi_в. \qquad (5)$$

В соответствии с предложенной во введении постановкой задачи (1) и представленной на рис. 1 структурой методики, формирование множества вариантов ОС космической системы и соответствующих им вариантов облика МКА осуществляется для каждого рассматриваемого значения высоты размещения ОГ. Учитывая высокую трудоемкость определения облика КА,

а также способа ОП под каждый вариант ОС, необходимо сократить множество значений рассматриваемых высот орбит МКА без потери оптимального решения.

В практике баллистического проектирования орбитальных структур одним из ключевых параметров, определяющих решение, является угол землеобзора космического аппарата. Очевидно, что непрерывное изменение этого параметра ведет к дискретным изменениям ОС и для каждого класса ОС могут быть точно определены значения угла землеобзора $\{\varphi_З\}_{\langle n_{ОС}\rangle}$, при котором происходит изменение ОС, сопровождающееся в общем случае изменением количества МКА и их распределением по плоскостям.

Особенностью функционирования МКА связи является наличие зависимости между углом землеобзора и минимальной высотой орбиты, при которой обеспечивается связь требуемого качества, определяемой условиями радиовидимости аппарата, которые характеризуемыми углом места МКА. Эта высота оказывается предпочтительной для размещения МКА, так как любое увеличение высоты орбиты приведет к утяжелению МКА связи вследствие роста затрат на обеспечение требований к энергетическим характеристикам радиолинии. Такая же тенденция будет соответствовать и затратам на выведение, связанным и с массой МКА, и с высотой орбит, на которые они выводятся. Следовательно, вариант формирования ОГ внизу диапазона высот, в котором сохраняется общее количество МКА в составе группировки, будет характеризоваться наименьшими затратами. Данная особенность позволяет сформировать конечное множество высот орбит $\{h\}_{\langle n_{ОС}\rangle}$, для которых следует выполнить обоснование облика МКА и способов формирования ОГ:

$$\{\varphi_З\}_{\langle n_{ОС}\rangle} \to \{h\}_{\langle n_{ОС}\rangle}: h = R\left(\frac{\cos\delta}{\cos(\delta+\varphi_З)} - 1\right), \tag{6}$$

где R – радиус Земли;

δ – угол места космического аппарата.

Таким образом, величина приращения высоты орбиты для каждой последующей итерации ΔH будет различной и сможет изменяться как в большую, так и в меньшую сторону.

В свою очередь, формирование облика МКА, соответствующего выбранному варианту ОС, начинается с обоснования требований к МКА со стороны потребителей КСС. Для этого выполняется имитационное моделирование целевого функционирования МКА в составе ОГ [1]. Главными результатами этого исследования являются: пиковая нагрузка на целевую систему МКА $q_{ЦС}$, определяющая технические характеристики целевой системы, и распределение нагрузки на целевую систему МКА в течение времени функционирования $q_{БС}$, которое, в свою очередь, позволяет сформировать требования к бортовому обеспечивающему комплексу МКА [11]:

$$M_{КС}: K_{ОГ} \times Q^{ТР} \to \{\langle q_{ЦС}, q_{БС}\rangle\}. \tag{7}$$

Полученные по результатам имитационного моделирования данные позволяют на основе использования существующих методик раннего проектирования КА определить основные проектные параметры МКА, соответствующего варианту ОС. Тогда

$$\begin{gathered} M_{МКА}: K_{ОГ} \times \{\langle q_{ЦС}, q_{БС}\rangle\} \to B_{МКА}, \\ b_{МКА} = \langle b_{ЦС}, b_{БС}, b_{К}\rangle \in B_{МКА}, \end{gathered} \tag{8}$$

где $b_{ЦС}, b_{БС}, b_{К}$ представляют собой комплекс проектных параметров бортового целевого комплекса, обеспечивающего и управляющего бортового оборудования и конструкции космического аппарата соответственно. Такие параметры определяют облик МКА, основными интегральными параметрами которого, имеющими значение в рамках методики, являются его масса и габаритные характеристики, определяющие возможность размещения МКА в составе космической головной части для выведения на орбиту той или иной ракетой-носителем (РН).

Результатом последовательного применения методик (7) и (8) для всего множества ОС $K_{\text{ОГ}} = \{k_{\text{ОГ}}\}_{\langle n_{\text{ОС}}\rangle}$ является множество вариантов построения ОГ $B_{\text{ОГ}} = \{\langle k_{\text{ОГ}}, b_{\text{МКА}}\rangle\}_{\langle n_{\text{ОС}}\rangle}$, из которого в соответствии с выражением (1) осуществляется выбор предпочтительного варианта $b^*_{\text{ОГ}}$. Выбор предпочтительного варианта состава и параметров ОГ и МКА осуществляется на основе сравнения затрат на создание и эксплуатацию ОГ, которые включают в себя затраты на создание МКА $c_{\text{МКА}}$ и затраты на выведение всех МКА ОГ. Очевидно, что ресурсоемкость будет зависеть от конечной ОС ОГ (количества МКА в составе ОГ, требуемой периодичности ее восполнения и др.), и она будет определяться как сумма стоимости всех МКА, входящих в ее состав, и вышеперечисленных затрат:

$$c_{\text{ОГ}} = c_{\text{МКА}} n_{\text{МКА}} + c_{\text{выв}}. \tag{9}$$

Затраты ресурсов определяются для всех рассматриваемых вариантов значений высоты. Для того чтобы оценить затраты ресурсов, производится стоимостная оценка разработки, производства и эксплуатации МКА. В соответствии с этапами создания МКА при оценке полных затрат принято считать, что затраты на разработку МКА для многоспутниковых группировок складываются из затрат на проведение предшествующих опытно-конструкторской работе (ОКР) научно-исследовательских работ (НИР), непосредственно на ОКР и проведение работ по освоению серийного производства:

$$\mathrm{c}_{\Sigma_\text{рр}} = \mathrm{c}_{\text{нир}} + \mathrm{c}_{\text{окр}} + \mathrm{c}_{\text{оп_пр}}, \tag{10}$$

где $c_{\text{нир}}$ – затраты на проведение научно-исследовательских работ;
$c_{\text{окр}}$ – затраты на проведение опытно-конструкторских работ;
$c_{\text{оп_пр}}$ – затраты на освоение серийного (опытного) производства.

Общая стоимость МКА для конкретного значения высоты будет складываться из доли стоимости разработки МКА и стоимости его изготовления [4]:

$$\mathrm{c}_{\text{МКА}} = \frac{\mathrm{c}_{\Sigma_\text{рр}}}{n_{\text{МКА}}} + \mathrm{c}_{\text{ПР}}, \tag{11}$$

где $\mathrm{c}_{\text{ПР}}$ – затраты на серийное производство отдельного МКА.

Поскольку МКА функционируют в составе ОГ КСС, то рассматривать стоимость выведения и летной эксплуатации для каждого отдельного МКА нецелесообразно. Оценка затрат ресурсов (стоимости) на развертывание ОГ для каждого значения высоты осуществляется с учетом группового выведения МКА и их распределения по орбитальным плоскостям. Учитывая наличие развитого парка средств выведения, необходимость резервирования и восполнения ОГ, а также распространенный опыт выведения попутной полезной нагрузки, при выполнении предварительных оценок вполне допустимо осуществлять расчет затрат на развертывание ОГ на основе удельной стоимости выведения одного килограмма полезной нагрузки выбранной ракетой-носителем. При этом следует учитывать грузоподъемность ракеты-носителя, а также условия размещения МКА под головным обтекателем. При определении стоимости развертывания ОГ $\mathrm{c}_{\text{разв}}$ в данном случае необходимо умножить удельную стоимость выведения полезной нагрузки $\mathrm{c}_{\text{пнк}}$ на суммарную выводимую массу $m_{\text{сумм}}$, включающую в себя не только массу всех МКА ОГ, но и массу используемых средств межорбитальной транспортировки в соответствии с выбранной схемой развертывания ОГ:

$$\mathrm{c}_{\text{разв}} = \mathrm{c}_{\text{пнк}} m_{\text{сумм}}. \tag{12}$$

Необходимо отметить, что итоговая стоимость выведения всех МКА ОГ будет зависеть от выбранного способа развертывания группировки, параметров РН, а также от выбора космодрома запуска. В общем виде она будет определяться как [6]

$$\mathrm{c}_{\text{выв}} = \mathrm{c}_{\text{разв}} + \mathrm{c}_{\text{нкэ}} + \mathrm{c}_{\text{тех}} + \mathrm{c}_{\text{рп_оч}}, \tag{13}$$

где $c_{\text{нкэ}}$ – затраты на поддержание наземного комплекса эксплуатации;
$c_{\text{тех}}$ – затраты на проведение технологических операций;
$c_{\text{рп_оч}}$ – затраты на поддержание районов падения отделяемых частей.

Таким образом, последовательное выполнение перечисленных этапов обоснования ОП КСС позволяет выбрать из множества рассмотренных вариантов ОС с соответствующими МКА вариант, отличающийся от остальных минимальными затратами на создание космического сегмента КСС при условии удовлетворения требований потребителей по объему и качеству оказываемых услуг связи.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ СПОСОБА И ПАРАМЕТРОВ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ

В качестве апробации можно привести пример обоснования способа орбитального построения ОГ МКА с целью обеспечения связью региона для следующих исходных данных:

1) регион обслуживания с угловыми координатами:
– нижняя граница $\psi_{\text{н}} = 40^0$ с. ш.;
– верхняя граница $\psi_{\text{н}} = 56$ с. ш.;
– левая граница $\lambda_{\text{л}} = 20^0$ з. д.;
– правая граница $\lambda_{\text{п}} = 150^0$ в. д;

2) модель абонента – единичные абоненты с фиксированным трафиком $v_{\text{АБ}}$ = 50 Мбит/с, распределенные случайно с равномерным законом по площади региона при условиях:

– суммарное количество абонентов – 2700 (параметры закона распределения координат абонентов и количество приняты исходя из среднестатистических данных);
– обслуживание района непрерывное.

В качестве первоначального этапа проведен синтез орбитальных структур для двух классов: КПС и «цепочек». Затем был произведен выбор вариантов ОС, предпочтительных по критерию требуемого количества МКА в составе орбитальной группировки Cr(O): $\min\{n_{\text{МКА}} | \ h_p\}$ в заданном диапазоне высот h_p. Для каждого значения высоты орбиты были обоснованы состав и параметры МКА, и с их учетом определены стоимость единичного МКА и ОГ в целом для каждого значения высоты орбиты. Результаты выполненных расчетов наглядно представлены на рис. 3 и 4.

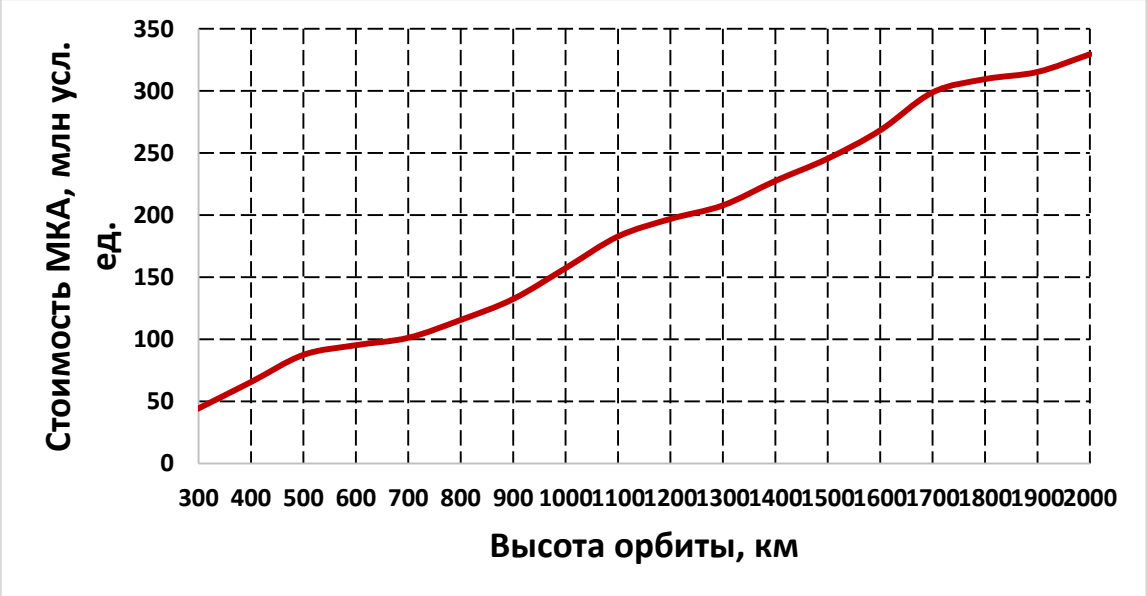


Рис. 3. Зависимость стоимости малого космического аппарата от высоты орбиты

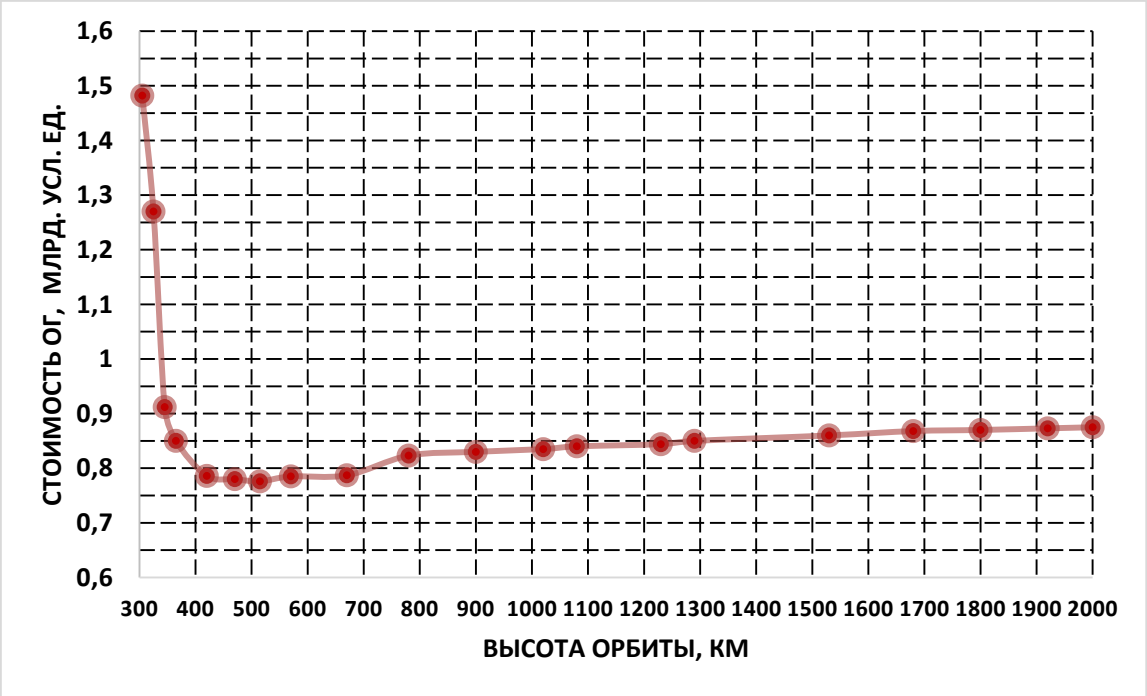


Рис. 4. Зависимость стоимости ОГ от высоты орбиты

Несмотря на то, что предложенная методика позволяет найти единственное решение, отличающееся минимумом затрат, результаты расчетов свидетельствуют, что существует область решений, в пределах которой результаты различаются незначительно, и у исследователя появляется возможность выбора предпочтительного варианта с учетом дополнительных критериев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные с помощью представленной в статье методики исследования по обоснованию ОС и параметров орбитального построения многоспутниковой орбитальной группировки с учетом облика МКА связи позволяют сделать следующие выводы:

1. Минимум функции полной стоимости орбитальной группировки находится в диапазоне высот орбит 400–700 км, далее стоимость монотонно растет.

2. Предпочтительным классом ОС из рассмотренных КПС и «цепочек» в этом диапазоне высот являются структуры «цепочек».

3. Очевидно, что стоимость создания и развертывания ОГ КС связи не может служить единственным показателем, входящим в состав критерия выбора проектных параметров МКА и группировки КС связи в целом, однако ее использование позволяет продемонстрировать применение комплексного подхода к выбору ОС и обоснованию облика МКА группировки космической системы, а также возможность постановки и решения оптимизационных задач по обоснованию проектных параметров системы.

4. Полученные оптимальные значения проектных параметров в большинстве случаев не смогут быть применены в неизменном виде из-за наличия многочисленных ограничений со стороны других элементов КС, но показывают объективные закономерности и области значений проектных параметров, учет которых заметно упростит поиск проектных решений.

Список использованных источников

1. *Абдурахимов А. А., Нечаев И. Ю.* Модель функционирования малого космического аппарата в составе многоспутниковой низкоорбитальной космической системы связи // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2024. – Вып. 693. – С. 69–79.

2. *Атаева М. Ю., Назаров А. М.* Современные цифровые беспроводные системы передачи данных // tecНика. – 2020. – Вып. 4. – С. 2–7.

3. *Длугоцкий Д. В., Дуга В. В.* Мега-группировки космических аппаратов США и перспективные средства их выведения // Зарубежное военное обозрение. – 2020. – Вып. 10. – С. 61–65.

4. *Иванов В. Г.* Основы построения и оценки эффективности функционирования системы связи специального назначения в международном вооруженном конфликте на основе многосферной и конвергентной структуры и ее элементов. – СПб., 2023. – 548 с.

5. Методика обоснования структуры системы космических аппаратов комбинированного состава / С. А. Власов [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2022. – № 1(140). – С. 24–39.

6. *Климкин В. А., Фокина Е. С.* Сравнительный анализ способов выведения орбитальной группировки малых низкоорбитальных космических аппаратов связи // Вестник БГТУ «Военмех». – 2020. – № 2. – С. 164–171.

7. *Козлов К. В., Макаренко С. И., Скрипник И. В.* Проблемные вопросы развития и обеспечения интероперабельности систем связи, радиотехнического обеспечения и автоматизации управления авиацией Военно-воздушных сил // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2024. – Вып. 30. – С. 84–95.

8. *Наими А. К., Дамшинов Ш. Р., Каюмов С. Т.* Анализ систем спутниковой связи и особенности современной аппаратуры // Наука и инновация. – 2020. – № 4. – С. 206–212.

9. *Кульвиц А. В., Мосин Д. А., Нечаев И. Ю.* Анализ вариантов развертывания многоплоскостной орбитальной группировки малых космических аппаратов с помощью энергодвигательной системы космического аппарата буксира // Авиакосмическое приборостроение. – 2024. – № 4. – С. 478–499.

10. *Орлов А. Е.* Возможности высокоскоростных спутниковых систем связи по предоставлению сервиса специальным абонентам // Стратегическая стабильность. – 2019. – Вып. 2. – С. 43–45.

11. *Абдурахимов А. А., Нечаев И. Ю., Уханов И. Г.* Методика обоснования параметров целевой системы малого космического аппарата связи как части низкоорбитальной группировки космической системы связи // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. – 2024. – № 3/65. – С. 67–71.

12. *Власов С.* А*., Богачев С. А., Горланов Н. В.* Оптимизация орбитальных структур систем космических аппаратов непрерывного обзора всей поверхности Земли, использующих полосы непрерывного обзора // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2025. – Вып. 698. – С. 24–37.

Е. В. Басотин[1],
доктор технических наук, доцент;
Р. М. Вивчарь[2],
кандидат технических наук;
А. В. Кривоносов[3];
И. Е. Сааль[4]
[1-3]Вонно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.
[4]ГРЦ имени академика В. П. Макеева, г. Миасс Челябинской обл.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ВОСПОЛНЕНИЯ ЗАПАСА МОРАЛЬНО УСТАРЕВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассматривается проблема восполнения элементов сложных военно-технических систем, обусловленная прогрессирующим моральным устареванием как самого оборудования, так и ограничений на поставку комплектующих иностранного производства. Разработано научно-методическое обеспечение, позволяющее количественно оценить вероятность реализации альтернативного сценария приобретения элементов, в виде комплексной методики, учитывающей возможность и условия каннибализации элементов, использования элементов-аналогов, а также возможность возобновления (восстановления) производства как оригинальным производителем, так и на стороннем предприятии в случае его прекращения. Использование представленной методики позволит снизить риск возникновения вынужденных простоев оборудования, вызванных отсутствием запасных частей, а также повысить обоснованность управленческих решений по поддержанию требуемого уровня готовности сложных военно-технических систем.

Ключевые слова: сложная военно-техническая система, возможность восполнения, каннибализация, аналоги, матрица критичности, нечеткая модель.

ВВЕДЕНИЕ

В основе научно-методического обеспечения, используемого для обоснования стратегии восполнения комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) сложной военно-технической системы (СВТС), лежит решение оптимизационной задачи, заключающееся в определении номенклатуры и количества находящихся на хранении элементов, обеспечивающих поддержание требуемого уровня готовности системы к решению целевых задач, и стоимости элементов комплекта ЗИП и их содержания. Очевидно, что избыточность комплекта ЗИП увеличивает затраты на хранение запасных частей, а также расходы на выполнение комплекса мероприятий по их обслуживанию после окончания гарантийного срока хранения. Недостаточное же количество приводит к вынужденным простоям оборудования, обусловленным временными затратами на поиск и поставку отказавших элементов.

Используемое в настоящее время научно-методическое обеспечение [1–3] имеет один существенный недостаток – источник восполнения запасов верхнего уровня считается всегда неиссякаемым. Однако в условиях прогрессирующего морального устаревания элементной базы, беспрецедентного санкционного давления на предприятия оборонно-промышленного комплекса возможность приобретения элементов технологического оборудования (ТлОб) существенно ограничивается. Прямой запрет на поставку комплектующих и расходных материалов иностранного производства снижает способность предприятий производить сборку изделий, в состав которых они входят, что крайне негативно сказывается на стабильности их работы, создавая предпосылки для закрытия производства (банкротства). В сложившихся условиях определение возможности своевременного бесперебойного восполнения комплектов ЗИП с учетом возможности прекращения производства отдельных элементов является весьма актуальным вопросом и требует разработки соответствующего научно-методического аппарата.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОПОЛНЕНИЯ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ СЛОЖНОЙ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Возможность восполнения элементов функциональной подсистемы СВТС будет определяться степенью их морального устаревания, наличием и характером санкционных ограничений в отношении рассматриваемых элементов.

В настоящее время степень морального устаревания эксплуатируемых изделий определяется лишь на качественном уровне: морально устаревающим считается изделие, в отношении которого будет объявлено о прекращении предоставления сервисных услуг, производства и (или) поставок комплектующих и расходных материалов их оригинальными производителями. Однако прекращение производства изделия оригинальным производителем не делает изделие полностью недоступным для приобретения. Возможность приобретения изделия будет зависеть от комплекса факторов, а именно: функционирования завода-изготовителя оригинальных запасных частей; способности возобновления производства изделия, его комплектующих и расходных материалов оригинальным или неоригинальным производителем; проведения каннибализации изделия с аналогичных объектов; использования аналогов запасных частей.

Следовательно, показателями возможности восполнения элементов в рассматриваемом случае являются:

$P_{\text{кан}}$ – вероятность реализации процедуры каннибализации оборудования;

$P_{\text{ан}}$ – вероятность реализации процедуры использования элементов-аналогов;

$P^{\text{о}}_{\text{пр}}(P^{\text{н}}_{\text{пр}})$ – вероятность возобновления производства элемента оригинальным производителем (неоригинальным производителем);

$P_{\text{ЗИ}}$ – вероятность функционирования в данный момент времени завода-изготовителя ТлОб.

Так как определение вероятности $P_{\text{ЗИ}}$ сводится к определению вероятности банкротства предприятия, то для ее нахождения можно воспользоваться апробированным математическим аппаратом, представленным в работах [4, 5].

Описание процедуры определения $P_{\text{кан}}$, $P_{\text{ан}}$ и $P^{\text{о}}_{\text{пр}}(P^{\text{н}}_{\text{пр}})$ представлено ниже.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ КАННИБАЛИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

Под каннибализацией будем понимать комплекс мероприятий по демонтажу исправных узлов, агрегатов и деталей с одного комплекта оборудования для установки на другой комплект с целью восстановления работоспособного (исправного) состояния в условиях дефицита запасных частей, времени или ремонтных мощностей.

Данный подход нашел широкое применение в авиационной отрасли, особенно за рубежом. Он используется для оперативного ремонта воздушных судов в связи с отсутствием в достаточном количестве запасных частей [6, 7]. Каннибализация может применяться при наличии нескольких однотипных комплектов оборудования при условии, что эти комплекты не функционируют одновременно, а демонтаж запасных частей с «донора» не приведет к срыву выполнения задач.

Для описания сложной динамики изменения состояний оборудования с целью оценки вероятности реализации процедуры каннибализации (использования в качестве «донора»)

наиболее удобно использовать графовые модели состояний [8, 9]. Граф эволюции состояний рассматриваемого ТлОб представлен на рис. 1.

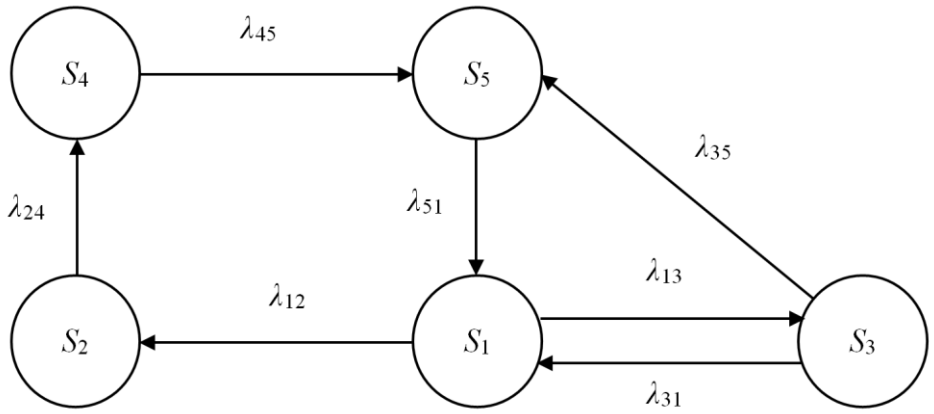


Рис. 1. Граф состояний модели функционирования оборудования для определения вероятности реализации процедуры каннибализации

Данная модель включает пять состояний, которые обозначены следующим образом:

S_1 – оборудование находится в процессе поддержания в готовности к применению по назначению, работоспособно, возможно использование в качестве «донора»;

S_2 – оборудование находится в процессе поддержания в готовности к применению по назначению, неработоспособно (в состоянии скрытого отказа), возможно использование в качестве «донора»;

S_3 – оборудование работоспособно, применяется по назначению, использование в качестве «донора» не допускается;

S_4 – оборудование неработоспособно, начинается процесс применения по назначению, использование в качестве «донора» не допускается;

S_5 – на оборудовании проводятся ремонтно-восстановительные работы, использование в качестве «донора» не допускается.

Как следует из рассмотрения рис. 1, использование данного оборудования в качестве «донора» возможно только в состояниях S_1 и S_2, поэтому вероятность реализации процедуры каннибализации $P_{\text{кан}}$ можно вычислить следующим образом:

$$P_{\text{кан}} = P_1 + P_2, \tag{1}$$

где P_1 – вероятность нахождения оборудования в работоспособном состоянии с возможностью использования его в качестве «донора»;

P_2 – вероятность нахождения оборудования в неработоспособном состоянии, но с возможностью использования его в качестве «донора».

Для нахождения вероятностей P_1 и P_2 необходимо определить интенсивности переходов между всеми возможными состояниями ТлОб:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{\text{о}}^1};\ \lambda_{13} = \frac{1}{\tau_{\text{п}}};\ \lambda_{31} = \frac{1}{T_{\text{п}}};\ \lambda_{24} = \left(\frac{1}{\lambda_{12}} - \frac{\tau_{\text{п}} e^{-\lambda_{12}\tau_{\text{п}}}}{1 - e^{-\lambda_{12}\tau_{\text{п}}}}\right)^{-1};\ \lambda_{45} = \frac{1}{T_{\text{п}}};\ \lambda_{35} = \frac{1}{T_{\text{о}}^2};\ \lambda_{51} = \frac{1}{T_{\text{в}}}, \tag{2}$$

где λ_{12} – интенсивность перехода оборудования в неработоспособное состояние, допускающее проведение каннибализации;

λ_{13} – интенсивность перехода оборудования в работоспособное состояние без возможности проведения каннибализации в связи с его применением по назначению;

λ_{31} – интенсивность перехода оборудования в состояние, допускающее проведение каннибализации;

λ_{24} – интенсивность перехода оборудования в неработоспособное состояние без возможности его демонтажа;

λ_{45} – интенсивность перехода оборудования в состояние недоступности для проведения каннибализации в результате выполнения его ремонта;

λ_{35} – интенсивность перехода оборудования из работоспособного состояния в состояние ремонта (проведение каннибализации не допускается);

λ_{51} – интенсивность перехода оборудования из состояния ремонта в работоспособное состояние (осуществление каннибализации возможно);

$T_{\text{о}}^{1}$ – средняя наработка на отказ в режиме поддержания в готовности к применению;

$T_{\text{о}}^{2}$ – средняя наработка на отказ в режиме применения по назначению;

$T_{\text{в}}$ – средняя продолжительность ремонта;

$\tau_{\text{п}}$ – средняя периодичность применения по назначению;

$T_{\text{п}}$ – средняя продолжительность применения по назначению.

Система дифференциальных уравнений (система уравнений А. Н. Колмогорова) для рассматриваемого графа состояний (см. рис. 1) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1}{dt} = P_3\lambda_{31} + P_5\lambda_{51} - P_1(\lambda_{13} + \lambda_{12}); \\ \dfrac{dP_2}{dt} = P_1\lambda_{12} - P_2\lambda_{24}; \\ \dfrac{dP_3}{dt} = P_1\lambda_{13} - P_3(\lambda_{31} + \lambda_{35}); \\ \dfrac{dP_4}{dt} = P_2\lambda_{24} - P_4\lambda_{45}; \\ \dfrac{dP_5}{dt} = P_4\lambda_{45} + P_3\lambda_{35} - P_5\lambda_{51}, \end{cases} \quad (3)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 – вероятности нахождения оборудования в состояниях S_1, S_2, S_3, S_4 и S_5 соответственно.

От системы дифференциальных уравнений (3) перейдем к системе алгебраических уравнений

$$\begin{cases} P_3\lambda_{31} + P_5\lambda_{51} - P_1(\lambda_{13} + \lambda_{12}) = 0; \\ P_1\lambda_{12} - P_2\lambda_{24} = 0; \\ P_1\lambda_{13} - P_3(\lambda_{31} + \lambda_{35}) = 0; \\ P_2\lambda_{24} - P_4\lambda_{45} = 0; \\ P_4\lambda_{45} + P_3\lambda_{35} - P_5\lambda_{51} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для решения системы исключим пятое уравнение, добавив нормирующее условие

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1. \quad (5)$$

В результате вычислений получим следующие решения:

$$P_2 = \frac{P_1\lambda_{12}}{\lambda_{24}};\ P_3 = \frac{P_1\lambda_{13}}{\lambda_{31}+\lambda_{35}};\ P_4 = \frac{P_1\lambda_{12}}{\lambda_{45}};\ P_5 = P_1\left(\frac{(\lambda_{13}+\lambda_{12})(\lambda_{31}+\lambda_{35})-\lambda_{31}}{\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})}\right);$$

$$P_1 = \frac{\lambda_{24}\lambda_{45}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})}{\lambda_{24}\lambda_{45}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})+\lambda_{12}\lambda_{45}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})+\lambda_{13}\lambda_{24}\lambda_{45}\lambda_{51}+} \quad (6)$$

$$\frac{}{+\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})+\lambda_{24}\lambda_{45}((\lambda_{13}+\lambda_{12})(\lambda_{31}+\lambda_{35})-\lambda_{31})}.$$

Итоговая формула для определения вероятности реализации процедуры каннибализации оборудования $P_{\text{кан}}$ примет следующий вид:

$$P_{\text{кан}} = \frac{\lambda_{24}\lambda_{45}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})}{\lambda_{24}\lambda_{45}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})+\lambda_{12}\lambda_{45}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})+\lambda_{13}\lambda_{24}\lambda_{45}\lambda_{51}+}$$

$$\frac{}{+\lambda_{12}\lambda_{24}\lambda_{51}(\lambda_{31}+\lambda_{35})+\lambda_{24}\lambda_{45}((\lambda_{13}+\lambda_{12})(\lambda_{31}+\lambda_{35})-\lambda_{31})}\cdot(1+\frac{\lambda_{12}}{\lambda_{24}}). \quad (7)$$

Полученное аналитическое выражение (7) позволяет учесть различные режимы эксплуатации и ремонта ТлОб при определении возможности его использования в качестве «донора» в целях повышения оперативности проведения ремонтно-восстановительных работ в условиях дефицита требуемых запасных частей.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-АНАЛОГОВ

Нахождение вероятности реализации процедуры использования элементов-аналогов $P_{\text{ан}}$ для восстановления работоспособного состояния оборудования основано на определении значимости каждого элемента функциональной подсистемы в общей структуре ТлОб, а также критичности последствий его отказа.

При проведении анализа критичности прежде всего необходимо учитывать влияние отказа элемента на ключевые факторы, определяющие эффективность функционирования ТлОб. Для объективного определения весов факторов и оценки элементов оборудования применяется метод экспертных оценок [10], который позволяет систематизировать коллективное мнение специалистов (экспертов) в области эксплуатации, ремонта и технического обслуживания оборудования.

Процедура включает следующие этапы:

Этап 1. Формирование экспертной группы из компетентных специалистов, имеющих опыт работы с оцениваемым оборудованием.

Этап 2. Выявление и ранжирование факторов критичности. Эксперты совместно определяют перечень ключевых факторов, для которых отказ элемента наиболее критичен, например с позиции результативности, оперативности, ресурсоемкости и безопасности функционирования системы.

Этап 3. Присвоение баллов. Каждый эксперт независимо присваивает всем элементам оборудования баллы от 1 до 5 по каждому фактору, руководствуясь следующими правилами:

«5» – критичный (отказ элемента приводит к отказу системы, значительным временным и ресурсным затратам на восстановление, а также к гибели личного состава);

«4» – высокий (отказ элемента приводит к отказу системы, высоким временным и ресурсным затратам на восстановление, к нанесению тяжкого вреда здоровью личному составу);

«3» – средний (значительно снижает необходимые значения тактико-технических характеристик, требует существенных временных и ресурсных затрат на восстановление, может привести к нанесению среднего вреда здоровья личному составу);

«2» – низкий (отказ оказывает несущественное влияние на функционирование системы, временные и ресурсные затраты минимальны, существует риск причинения легкого вреда здоровью личному составу);

«1» – минимальный (отказ практически не влияет на работу системы, временные и ресурсные затраты минимальны, риск получения травм личным составом отсутствует).

Этап 4. Обработка результатов. Полученные от экспертов оценки обрабатываются методами статистического анализа (рассчитывается среднее арифметическое или медиана оценок для минимизации субъективности). На основе усредненных данных заполняется итоговая матрица факторов (табл. 1).

Таблица 1

Матрица факторов для оценки критичности отказа элемента

Наименование	Результативность	Оперативность	Ресурсоемкость	Безопасность	Сумма баллов
Элемент 1	5	3	4	5	17
Элемент 2	3	1	2	1	7
……..……					
Элемент *N*	4	2	4	5	15

Важно отметить, что критичность элементов при определении влияния отказов на эффективность функционирования ТлОб может изменяться под воздействием деструктивных факторов, поэтому данная матрица требует периодической корректировки.

Так, например, на начальном этапе выполнения работ технологического графика отказ *n*-го элемента функциональной подсистемы не влияет на результативность и безопасность ТлОб, так как имеется достаточное количество резервного времени для устранения отказа, однако на последнем этапе технологического графика отказ этого элемента может привести к срыву выполнения целевой задачи, а также к значительному ущербу.

На основе матрицы факторов в соответствии с работой [11] формируется матрица рисков, представляющая собой также двумерную таблицу, где по одной оси отображается ожидаемая частота возникновения отказа $Q(t)$, а по другой – уровни последствий при его наступлении (табл. 2). Пересечение уровней последствий и частоты возникновения отказа определяет ранг критичности оборудования и возможность применения аналогов.

Таблица 2

Матрица рисков для оценки критичности отказа элемента

Ожидаемая частота возникновения отказа	Уровни последствий			
	Ничтожный 1–5	Минимальный 6–10	Критический 11–15	Катастрофический 16–20
Практически невозможный отказ ($Q(t) < 0,001$)	Низкоприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Низкоприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Высокоприоритетный элемент (только оригинальные запчасти)	Высокоприоритетный элемент (только оригинальные запчасти)
Редкий ($0,001 < Q(t) < 0,01$)	Низкоприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Низкоприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Высокоприоритетный элемент (только оригинальные запчасти)	Высокоприоритетный элемент (только оригинальные запчасти)

Окончание табл. 2

Ожидаемая частота возникновения отказа	Уровни последствий			
	Ничтожный 1–5	Минимальный 6–10	Критический 11–15	Катастрофический 16–20
Возможный $(0,01 < Q(t) < 0,1)$	Низкоприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Низкоприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Высокоприоритетный элемент (только оригинальные запчасти)	Высокоприоритетный элемент (только оригинальные запчасти)
Вероятный $(0,1 < Q(t) < 0,2)$	Среднеприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Среднеприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Высокоприоритетный элемент (только оригинальные запчасти)	Критичный элемент (только оригинальные запчасти)
Частый $(Q(t) > 0,2)$	Среднеприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Среднеприоритетный элемент (допустимы аналоги)	Критичный элемент (только оригинальные запчасти)	Критичный элемент (только оригинальные запчасти)

Значения вероятности $P_{\text{ан}}$ в представленной модели описываются с помощью бинарной шкалы, где значение 1 соответствует положительному исходу события, а значение 0 – отрицательному.

На основе анализа данных табл. 2 можно сделать вывод, что при критическом и катастрофическом уровнях последствий наступления отказа независимо от частоты его возникновения для элементов оборудования применение аналогов запасных частей запрещено, следовательно, $P_{\text{ан}} = 0$. Во всех остальных случаях использование аналогов допустимо, т. е. $P_{\text{ан}} = 1$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ

Возможность возобновления производства изделия оригинальным производителем, а также возможность производить изделие на стороннем предприятии зависит от следующих факторов:

– наличия, комплектности и актуальности рабочей конструкторской документации (РКД);

– наличия и состояния технологических линий для производства, сборки и контроля качества изделий;

– наличия и состояния кооперации поставщиков комплектующих элементов;

– наличия, квалификации и опыта работы персонала.

Исходные данные для оценки возможности возобновления (начала) производства (получения численной вероятностной оценки) являются сложными, разнородными и поступают из различных источников. Это обуславливает потребность в применении уникальных алгоритмов для их структурирования и анализа.

Для получения количественного значения вероятности возобновления производства изделия целесообразно использовать нечеткую продукционную модель со структурой типа MISO (с несколькими входами и одним выходом) [12, 13], структурная схема которой показана на рис. 2.

Для формирования блока исходных данных представим факторы, влияющие на возможность возобновления производства, в виде лингвистических переменных [14], характеризующих на качественном уровне прямые и косвенные признаки, влияющие на возможность восстановления производства изделия.

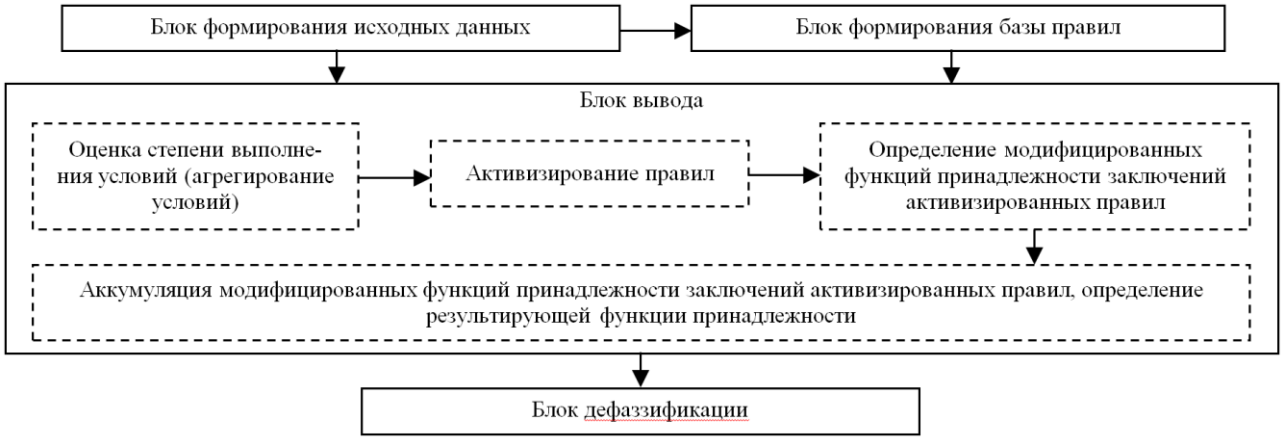


Рис. 2. Структурная схема классической нечеткой продукционной модели со структурой типа MISO

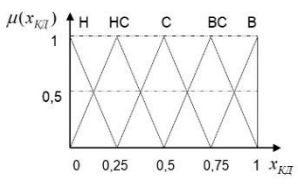
Логика построения синтаксических правил, порождающих терм-множества лингвистической переменной, в настоящей работе позволяет формировать мнения экспертов в более «мягкой» форме, в единицах универсальной числовой шкалы от 0 до 1. Такой подход позволит организовать работу экспертной группы одним из известных и хорошо себя зарекомендовавшим способом [15].

Для описания семантических правил, связывающих название *X* лингвистической переменной *x* с ее значением *M*(*x*), применяются симметричные треугольные функции принадлежности. Эти функции имеют двухстороннее ограничение на диапазон параметров и удовлетворяют условию полноты покрытия (разбиения единицы). Их ключевые преимущества – минимальные требования к исходным данным и удобство их обработки.

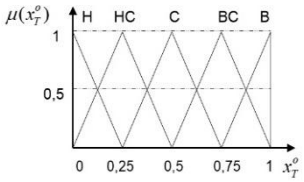
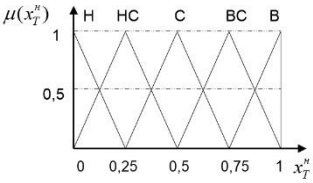
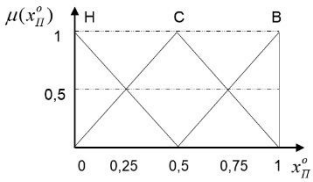
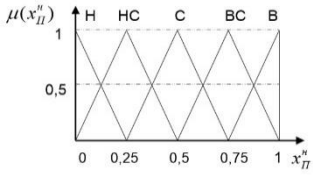
Перечень используемых лингвистических переменных приведен в табл. 3.

Таблица 3

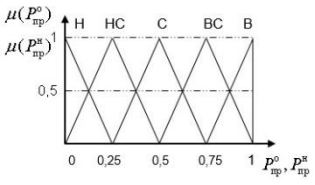
Исходные данные для моделирования процесса оценивания вероятности возобновления (восстановления) производства изделия

№	Лингвистическая переменная (обозначение)	Терм-множество $T(x)$	Синтаксическое правило, порождающее терм-множество $T(x)$ переменной *x*
1	Конструкторская документация ($x_{КД}$) 	В (*высокий*)	Конструкторская документация в полном объеме, актуальна (своевременно внесены все изменения)
		ВС (*выше среднего*)	Конструкторская документация в полном объеме, нуждается в уточнении
		С *(средний)*	В наличии базовый комплект конструкторской документации
		НС (*ниже среднего*)	Конструкторская документация не в полном объеме
		Н (*низкий*)	Конструкторская документация отсутствует (утрачена)

Продолжение табл. 3

№	Лингвистическая переменная (обозначение)	Терм-множество $T(x)$	Синтаксическое правило, порождающее терм-множество $T(x)$ переменной *x*
2	Технология производства оригинального производителя (x_T^o) 	В (*высокий*)	Технологическое оборудование для производства в наличии, в работоспособном состоянии. Кооперация поставщиков комплектующих, материалов и сырья функционирует устойчиво
		ВС (*выше среднего*)	Технологическое оборудование для производства в наличии, законсервировано (находится на хранении) или используется для других целей, обслуживается. Кооперация поставщиков комплектующих, материалов и сырья нуждается в уточнении
		С (*средний*)	Технологическое оборудование для производства в наличии, не обслуживается. Необходимо частичное восстановление кооперации поставщиков комплектующих, материалов и сырья
		НС (*ниже среднего*)	Технологическое оборудование демонтировано, находится на хранении. Необходимо восстановление кооперации поставщиков комплектующих, материалов и сырья
		Н (*низкий*)	Технологическое оборудование демонтировано, ликвидировано
3	Технология производства у неоригинального производителя ($x_T^н$) 	В (*высокий*)	В наличии высокотехнологичное оборудование, позволяющее изготавливать отдельные элементы и осуществлять сборку изделия, поставщики комплектующих, материалов и сырья в наличии
		ВС (*выше среднего*)	В наличии высокотехнологичное оборудование, позволяющее изготавливать и осуществлять сборку изделия, требуется восстановление сети поставок комплектующих
		С (*средний*)	В наличии оборудование, аналогичное оригинальному производителю, позволяющее изготавливать и осуществлять сборку изделия, функционирует сети поставок комплектующих
		НС (*ниже среднего*)	В наличии оборудование, аналогичное оригинальному производителю, позволяющее изготавливать и осуществлять сборку изделия, требуется восстановление сети поставок комплектующих
		Н (*низкий*)	Оборудование отсутствует
4	Персонал оригинального производителя ($x_П^o$) 	В (*высокий*)	Квалифицированный персонал в наличии, опытом изготовления изделия обладает
		С (*средний*)	Квалифицированный персонал в наличии, опытом изготовления изделия не обладает
		Н (*низкий*)	Квалифицированный персонал отсутствует
5	Персонал не оригинального производителя ($x_П^н$) 	В (*высокий*)	Для изготовления изделия не требуется высококвалифицированный персонала, не требуется дополнительное обучение.
		ВС (*выше среднего*)	Для изготовления изделия не требуется высококвалифицированный персонал, требуется дополнительное обучение.
		С (*средний*)	Требования к персоналу нуждаются в уточнении.
		НС (*ниже среднего*)	Для изготовления изделия требуется высококвалифицированный персонал, дополнительное обучение не требуется.

Окончание табл. 3

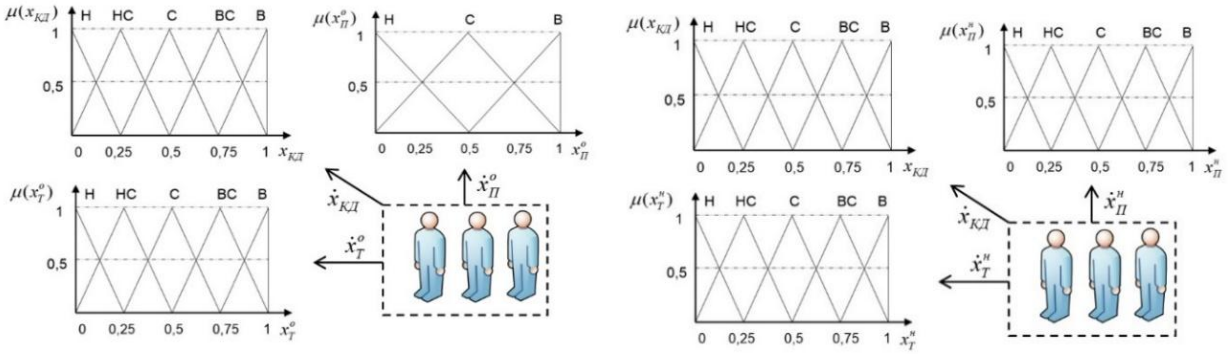
№	Лингвистическая переменная (обозначение)	Терм-множество $T(x)$	Синтаксическое правило, порождающее терм-множество $T(x)$ переменной x
		Н (*низкий*)	Для изготовления изделия требуется и высококвалифицированный персонал, и дополнительное обучение
6	Вероятность возобновления производства ($P_{\text{пр}}$) 	В (*высокий*)	Вероятность того, что производство изделия может быть возобновлено, более 0,75
		ВС (*выше среднего*)	Вероятность того, что производство изделия может быть возобновлено, более 0,5, но менее 0,75
		С (*средний*)	Вероятность того, что производство изделия может быть возобновлено, более 0,25, но менее 0,5
		НС (*ниже среднего*)	Вероятность того, что производство изделия может быть возобновлено, менее 0,25
		Н (*низкий*)	Вероятность того, что производство изделия может быть возобновлено, стремится к 0

На рис. 3 представлены схемы блока формирования исходных данных для оценки вероятности возобновления производства изделия оригинальным производителем (а) и восстановления производства на стороннем предприятии (б), на которых введены следующие обозначения:

$\dot{x}_{\text{КД}}$ – согласованное суждение экспертов относительно вероятности возобновления (восстановления) производства изделия в единицах универсальной числовой шкалы исходя из наличия и состояния РКД;

$\dot{x}_T^o$, $\dot{x}_{\text{Т}}^{\text{н}}$ – согласованное суждение экспертов относительно вероятности возобновления (восстановления) производства изделия в единицах универсальной числовой шкалы исходя из состояния технологической базы производства изделия;

$\dot{x}_{\text{П}}^o$, $\dot{x}_{\text{П}}^{\text{н}}$ – согласованное суждение экспертов относительно вероятности возобновления (восстановления) производства изделия в единицах универсальной числовой шкалы исходя из наличия и квалификации персонала.



а) б)

Рис. 3. Схемы блока формирования исходных данных для оценки вероятности возобновления производства:
а – оригинальным производителем;
б – неоригинальным производителем

Ядром рассматриваемой модели является база правил, которая представляет собой набор продукционных правил, сконструированных на основе эвристических предпочтений и выраженных в виде утверждений «*если – то*» на естественном языке.

Суть предлагаемого способа построения базы правил заключается в генерации всех возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках и определении соответствующих этим сочетаниям нечетких заключений. Использование прямого способа построения базы правил позволяет снизить трудоемкость работ по обеспечению полноты, связности и непротиворечивости базы. Фрагменты формализованных баз правил представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Фрагмент базы правил нечеткой модели определения вероятности восстановления производства оригинальным изготовителем

№ правила	*Если (предпосылки)*					*То (заключение)*	
	ЛП ($x_{КД}$)	Логич. оператор	ЛП ($x_{Т}^{о}$)	Логич. оператор	ЛП ($x_{П}^{о}$)	ЛП ($P_{пр}^{о}$)	
	$T(x_{КД})$		$T(x_{Т}^{о})$		$T(x_{П}^{о})$	$T(P_{пр}^{о})$	
1	Н	«И»	Н	«И»	Н	→	Н
…	…	«И»	…	«И»	…	→	…
41	С	«И»	ВС	«И»	С	→	С
…	…	«И»	…	«И»	…	→	…
75	В	«И»	В	«И»	В	→	В

Таблица 5

Фрагмент базы правил нечеткой модели определения вероятности возобновления производства сторонним предприятием

№ правила	*Если (предпосылки)*					*То (заключение)*	
	ЛП ($x_{КД}$)	Логич. оператор	ЛП ($x_{Т}^{н}$)	Логич. оператор	ЛП ($x_{П}^{н}$)	ЛП ($P_{пр}^{н}$)	
	$T(x_{КД})$		$T(x_{Т}^{н})$		$T(x_{П}^{н})$	$T(P_{пр}^{н})$	
1	Н	«И»	Н	«И»	Н	→	Н
2	Н	«И»	Н	«И»	НС	→	Н
…	…	«И»	…	«И»	…	→	…
41	НС	«И»	ВС	«И»	Н	→	С
…	…	«И»	…	«И»	…	→	…
125	В	«И»	В	«И»	В	→	В

В блоке вывода производится агрегирование условий: оцениваются степени выполнения каждого правила. Агрегирование условий осуществляется следующим образом (для базы правил, фрагмент которой представлен в табл. 5):

$$
\begin{aligned}
&A_1 = T(\mu_{Н}(\dot{x}_{КД}), \mu_{Н}(\dot{x}_{Т}^{н}), \mu_{Н}(\dot{x}_{Т}^{н}));\\
&\text{.....};\\
&A_{i(41)} = T(\mu_{НС}(\dot{x}_{КД}), \mu_{ВС}(\dot{x}_{Т}^{н}), \mu_{Н}(\dot{x}_{Т}^{н}));\\
&\text{.....};\\
&A_{125} = T(\mu_{В}(\dot{x}_{КД}), \mu_{В}(\dot{x}_{Т}^{н}), \mu_{В}(\dot{x}_{Т}^{н}));
\end{aligned}
\qquad (8)
$$

В формуле (8) используются следующие обозначения: A_i $(i = 1,...,m)$ – степень выполнения условий i -го правила, а T – какой-либо оператор t-нормы.

Наиболее часто применяемым является оператор *PROD*, однако в ходе настройки модели может быть использован иной оператор.

Поясним дальнейшие рассуждения на практическом примере.

Дано: (Е) – изделие, в отношении которого реализуется процедура определения значения вероятности возобновления производства на стороннем предприятии $\dot{P}^{\text{н}}_{\text{пр}}$. Эксперты, оценив наличие и состояние РКД, изучив состояние одного из предприятий на основе своего опыта, с учетом информации, содержащейся в описании лингвистических переменных, следующим образом вынесли свое суждение о возможности (вероятности) возобновления производства изделия (Е) на предприятии: $\dot{x}_{\text{КД}} = 0,8;\ \dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}} = 0,65;\ \dot{x}^{\text{н}}_{\text{П}} = 0,45.$

Агрегирование условий может осуществляться как с использованием графических методов, так и аналитически.

На рис. 4 представлена схема получения исходных данных для последующего агрегирования условий с использованием графического метода.

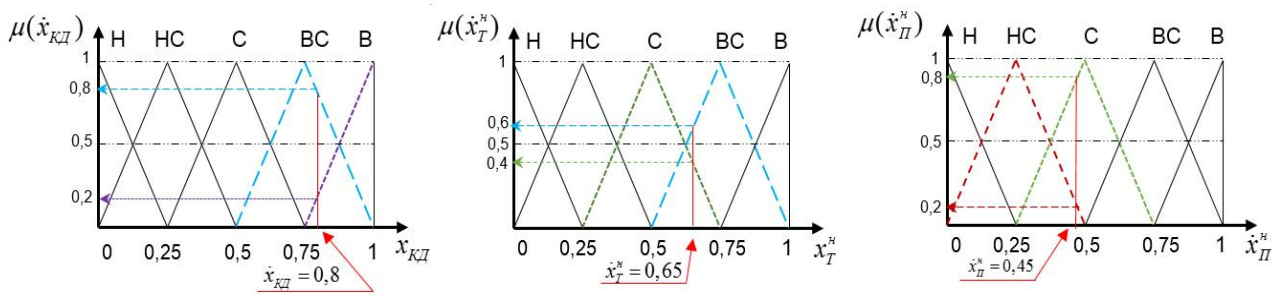


Рис. 4. Графический метод получения исходных данных для агрегирования условий

В табл. 6 приведены аналитические выражения для определения степени выполнения условий. Оценка степени выполнения условия с использованием оператора t-нормы PROD выполняется следующим образом (на примере правила № 1 табл. 5 по исходным данным, представленным в табл. 6):

$$A_1 = T\left(\mu_{\text{Н}}\left(\dot{x}_{\text{КД}}\right), \mu_{\text{Н}}\left(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}}\right), \mu_{\text{Н}}\left(\dot{x}^{н}_{T}\right)\right) = \mu_{\text{Н}}\left(\dot{x}_{\text{КД}}\right)\mu_{\text{Н}}\left(\dot{x}^{н}_{T}\right)\mu_{\text{Н}}\left(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}}\right) = 0. \qquad (9)$$

Таблица 6

Пример получения исходных данных для агрегирования условий

Аналитическое выражение	Полученные данные для агрегирования условий в соответствии со значениями входных переменных		
$\mu(x) = \begin{cases} \mu_{\text{н}}(x) = 1 - 4x, & \text{если } 0 \le x \le 0,25; \\ \mu_{\text{НС}}(x) = \begin{cases} 4x, & \text{если } 0 \le x \le 0,25; \\ 2 - 4x, & \text{если } 0,25 \le x \le 0,5; \end{cases} \\ \mu_{\text{С}}(x) = \begin{cases} 4x - 1, & \text{если } 0,25 \le x \le 0,5; \\ 3 - 4x, & \text{если } 0,5 \le x \le 0,75; \end{cases} \\ \mu_{\text{ВС}}(x) = \begin{cases} 4x - 2, & \text{если } 0,5 \le x \le 0,75; \\ 4 - 4x, & \text{если } 0,75 \le x \le 1; \end{cases} \\ \mu_{\text{Н}}(x) = 4x - 3, & \text{если } 0,75 \le x \le 1. \end{cases}$	$\dot{x}_{\text{КД}} = 0,8;$	$\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}} = 0,65;$	$\dot{x}^{\text{н}}_{\text{П}} = 0,45.$
	$\mu_{\text{Н}}(\dot{x}_{\text{КД}}) = 0;$ $\mu_{\text{НС}}(\dot{x}_{\text{КД}}) = 0;$ $\mu_{\text{С}}(\dot{x}_{\text{КД}}) = 0;$ $\mu_{\text{ВС}}(\dot{x}_{\text{КД}}) = 0,8;$ $\mu_{\text{В}}(\dot{x}_{\text{КД}}) = 0,2.$	$\mu_{\text{Н}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}}) = 0;$ $\mu_{\text{НС}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}}) = 0;$ $\mu_{\text{С}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}}) = 0,4;$ $\mu_{\text{ВС}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}}) = 0,6;$ $\mu_{\text{В}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{Т}}) = 0;$	$\mu_{\text{Н}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{П}}) = 0;$ $\mu_{\text{НС}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{П}}) = 0,2;$ $\mu_{\text{С}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{П}}) = 0,8;$ $\mu_{\text{ВС}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{П}}) = 0;$ $\mu_{\text{В}}(\dot{x}^{\text{н}}_{\text{П}}) = 0;$

Проведя аналогичную процедуру для всех условий, получим, что степень выполнения условий не равна нулю в правилах, представленных в табл. 7.

Таблица 7

Степень выполнения условий с использованием оператора *t*-нормы *PROD*

№ правила	Условие					Степень выполнения условия	
	ЛП ($x_{КД}$)	Логич. оператор	ЛП ($x_{Т}^{н}$)	Логич. оператор	ЛП ($x_{П}^{н}$)		
	$T(x_{КД})$		$T(x_{Т}^{н})$		$T(x_{П}^{н})$	A_i / Закл.	
87	ВС	«И»	С	«И»	НС	0,064	С
88	ВС	«И»	С	«И»	С	0,256	С
92	ВС	«И»	ВС	«И»	НС	0,096	ВС
93	ВС	«И»	ВС	«И»	С	0,384	ВС
112	В	«И»	С	«И»	НС	0,016	С
113	В	«И»	С	«И»	С	0,064	С
117	В	«И»	ВС	«И»	НС	0,024	ВС
118	В	«И»	ВС	«И»	С	0,096	В

Применение оператора *t*-нормы *PROD* предоставляет важное преимущество: оно позволяет определить полноту и совместность базы правил. Критерием выполнения этих свойств является равенство единице суммы степеней активации всех правил для любого набора входных значений лингвистических переменных. Правила, степень выполнения условий которых не равна нулю, считаются активизированными.

Результаты агрегирования (активизирования) правил, представленные в табл. 7, могут непосредственно быть использованы для дальнейших вычислений с целью получения значения выходной переменной в случае применения в процессе дефаззификации метода высот. Из всего многообразия методов дефаззификации метод высот отличается высокой чувствительностью, так как позволяет учитывать влияние на конечный результат всех активизированных правил. Предлагаемый метод также существенно упрощает вычислительную процедуру. Он избавляет от необходимости выполнять трудоемкие этапы, связанные с модификацией функций принадлежности для активизированных правил, их последующим объединением и расчетом итоговой функции принадлежности.

При использовании данного подхода четкое значение выходной переменной $\dot{P}_{пр}^{н}$ будет определяться по следующему выражению:

$$\dot{P}_{пр}^{н} = \frac{\sum_{i=1}^{k_{A_i}} A_i P_{iпр}^{и}}{\sum_{i=1}^{k_{A_i}} A_i}, \qquad (10)$$

где k_{A_i} – число активизированных правил;

A_i – степень выполнения условия i -го активизированного правила;

$P_{iпр}^{и}$ – значение синглетона множества заключения i -го активизированного правила.

Графическая интерпретация определения значения выходной переменной представлена в виде схемы на рис. 5.

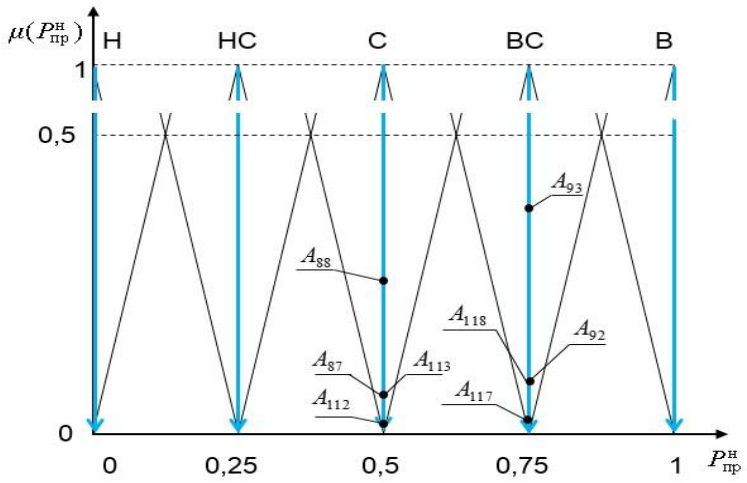


Рис. 5. Схема дефаззификации методом высот

С учетом равенства единице суммы степеней выполнения условий всех правил, подставим в выражение (10) данные из табл. 7 и получим:

$$\dot{P}^{и}_{пр} = \frac{\sum_{i=1}^{k_{A_i}} A_i P^{и}_{iпр}}{\sum_{i=1}^{k_{A_i}} A_i} = \sum_{i=1}^{k_{A_i}} A_i P^{и}_{iпр} = 0,064 \cdot 0,5 + 0,256 \cdot 0,5 + 0,096 \cdot 0,75 + 0,384 \cdot 0,75 +$$

$$+ 0,016 \cdot 0,5 + 0,064 \cdot 0,5 + 0,024 \cdot 0,75 + 0,096 \cdot 1 = 0,67.$$

Таким образом, вероятность возобновления производства изделия на стороннем (не оригинальном) предприятии $P^{н}_{пр}$ при заданных исходных данных составляет 0,67.

Аналогичным способом вычисляется вероятность возобновления производства изделия на оригинальном заводе-изготовителе $P^{о}_{пр}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом применения представленной методики являются количественные оценки вероятностей реализации различных способов восполнения комплектов ЗИП ТлОб для проведения их сравнительной оценки и, с учетом требований по оперативности и ресурсоемкости, для принятия решения о реализации превентивных мер для обеспечения бесперебойной эксплуатации оборудования.

Научная новизна разработанной методики заключается в учете возможности каннибализации элементов, использования элементов-аналогов, а также возобновления (восстановления) производства как оригинальным производителем, так и на стороннем предприятии при оценивании вероятности реализации альтернативных сценариев приобретения элементов ТлОб, что позволит снизить риск возникновения вынужденных простоев оборудования, вызванных отсутствием запасных частей, а также повысить обоснованность управленческих решений по поддержанию требуемого уровня готовности СВТС.

Список использованных источников

1. ГОСТ 27.507–2015. Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов. – М. : Стандартинформ, 2016. – 52 с.

2. *Рыжиков Ю. И.* Теория очередей и управление запасами. – СПб. : Питер, 2001. – 384 с.

3. *Кокарев А. С., Марченко М. А., Пачин А. В.* Разработка комплексной программы повышения ремонтопригодности сложных технических комплексов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4-3. – С .501–505.

4. *Зайцев Ю. К., Лощенкова А. Н.* Влияние санкций на выручку российских компаний // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2024. – № 2(63). – С. 57–74.

5. *Жданов В. Ю., Афанасьева О. А.* Модель диагностики риска банкротства предприятий авиационно-промышленного комплекса // Корпоративные финансы : электрон. журн. – 2011. – № 4(20). – С. 77–89.

6. *Sherg J., Prescott D.* A hierarchical colored Petri net model of fleet maintenance with cannibalization // Reliability Engineering & System Safety. – 2017. – Vol. 168. – P. 290–305.

7. *Fisher W.W.* Issues and Models in Maintenance Systems Incorporating Cannibalization: A Review // Information Systems and Operational Research. – 1990. – Vol. 28(1). – P. 154–164.

8. *Перминов А. Н.* Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния : моногр. – МО РФ, 2005. – 320 с.

9. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов: учеб. пособие. – М. : Высш. шк., 1981. – 368 с.

10. *Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г.* Экспертные оценки. – М. : Наука, 1973. – 297 с.

11. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 1997. – 20 с.

12. *Борисов В. В.* Нечеткие модели и сети. – 2-е изд., стереотип. – М. : Горячая линия–Телеком, 2019. – 284 с.

13. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. под ред. Ю. В. Тюменцева. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.

14. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений : пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – 166 с.

15. *Семенов С. С.* Оценка качества и технического уровня сложных систем : Практика применения метода экспертных оценок. – М. : ЛЕНАНД, 2019. – 352 с.

С. В. Загорный,
кандидат технических наук;
А. В. Казимиров,
кандидат технических наук, доцент;
Р. О. Лашко

МОДЕЛЬ ТЕРМОБАРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА ОБЪЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСА ЗАПРАВКИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ СЖИЖЕННЫМ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ

В статье описана модель термобарического воздействия взрыва горючего облака на объекты безопасности, сформированного компонентом ракетного топлива и воздухом в случае разгерметизации элементов гидравлической системы комплекса заправки ракет-носителей сжиженным природным газом. Модель базируется на физико-химических свойствах сжиженного природного газа и при применении пробит-анализа, что позволяет определить вероятности нанесения ущерба объектам безопасности ударной волной и лучистым тепловым потоком, вызванными инициацией данного компонента ракетного топлива в смеси с воздухом. Также в статье приведены алгоритм расчета термобарического воздействия, его оценка и анализ для типового случая разгерметизации криогенного трубопровода.

Ключевые слова: комплекс заправки ракеты-носителя, сжиженный природный газ, ударная волна, тепловое излучение, горючее облако, пробит-функция, вероятность летального поражения персонала, вероятность нелетального поражения персонала.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития отечественной ракетно-космической отрасли является применение новых компонентов ракетных топлив (КРТ), обладающих более высокими энергетическими характеристиками, более экологически безопасными и позволяющими увеличить ресурс силовой установки ракеты-носителя за счет повышения полноты сгорания и, как следствие, понижения коксоотложения на деталях ее жидкостных ракетных двигателей. Все эти требования, в той или иной степени, сочетаются в таком перспективном КРТ как сжиженный природный газ (СПГ).

В настоящее время в нашей стране проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, целью которых является создание ракеты-носителя (РН), использующей СПГ, и инфраструктуры для ее запуска [1, 2]. Наиболее проблематичным аспектом этих работ является создание комплекса заправки (КЗ), удовлетворяющего современным нормам по безопасности эксплуатации (по возможности КЗ наносить ущерб объектам безопасности). Такие нормы регламентируются системой общих требований к видам вооружения и военной техники.

Очевидно, что основным фактором потенциальной возможности нанесения ущерба объектам безопасности при эксплуатации КЗ РН СПГ (обслуживающему персоналу, самому КЗ РН СПГ и сопрягаемым с ним объектам, окружающей природной среде) является образование гомогенных газовых смесей испарившегося криопродукта с воздухом. Такие смеси приобретают облачную структуру и могут перемещаться под действием ветра в приземном слое атмосферы на значительные расстояния, тем самым расширяя зону потенциальной опасности.

Наибольшей опасностью обладает смесь СПГ с воздухом в диапазоне процентной концентрации от 5 до 15, так как инициированная окислительно-восстановительная реакция в таком горючем облаке обязательно приведет к его взрыву. В результате этого ущерб объектам безопасности будет обусловлен совместным действием ударной волны и теплового потока.

Вопросы обеспечения безопасности эксплуатации сложных технических систем хорошо описаны в работах И. А. Рябинина [3], О. В. Краснова [4] и др. К таким сложным техниче-

ским системам, без сомнения, можно отнести и будущий КЗ РН СПГ. В указанных работах рассмотрен способ разработки моделей опасных событий, которые могут иметь место при эксплуатации сложных технических систем (например, взрыва или пожара). А вот вопросы создания моделей нанесения ущерба объектам безопасности в тех случаях, когда событие уже произошло, не рассматриваются.

Кроме того, в космической отрасли есть непродолжительный опыт применения комплексов заправки криогенным горючим – жидким водородом, но этот опыт не описан с точки зрения воздействия на объекты безопасности взрыва водородно-воздушной смеси. Поэтому отсутствует возможность перенять его для КЗ РН СПГ.

Тем не менее существует опыт эксплуатации общепромышленных систем, предназначенных для получения, хранения и транспортировки жидких и газообразных углеводородов. К таким системам можно отнести, например, заводы по выработке сжатого углеводородного газа (СУГ), газопроводы для подачи СУГ в места его потребления, заводы по производству СПГ и системы его погрузки в корабельные газовозы или транспортировочные цистерны. Для этих систем ведется статистика чрезвычайных происшествий и нештатных ситуаций и существуют модели оценивания воздействия поражающих факторов на объекты безопасности в целом и на обслуживающий персонал в частности.

Наиболее близкими по архитектуре расположения технологического оборудования и строению элементов гидравлической системы (ГС) к КЗ РН СПГ можно считать системы по погрузке СПГ в корабельные газовозы или транспортировочные цистерны. Такими системами, например, оснащен российский среднетоннажный завод по производству СПГ и морской СПГ-терминал «Криогаз-Высоцк СПГ». Основным принципиальным отличием таких систем от КЗ РН СПГ является то, что в вышеуказанных системах осуществляется перекачка продукта из криогенной емкости-хранилища в предварительно захолаженную (уже содержащую продукт в объеме 10% от транспортируемого) криогенную емкость, которая расположена на объекте транспорта и рассчитана на воздействие опасных факторов от близкой инициации продукта, вышедшего за пределы ГС.

При эксплуатации же КЗ РН СПГ будет осуществляться заправка нетеплоизолированных баков РН, что приведет к возрастанию объема технологических операций, направленных на захолаживание этих баков, сжижение или дожигание образующихся при этом дренажей КРТ и постоянную предстартовую подпитку баков. Кроме того, сама РН, находящаяся на стартовом комплексе (СК), также является объектом безопасности, и ее корпус абсолютно не защищен от воздействия поражающих факторов, сформированных взрывом СПГ-воздушного горючего облака.

Исходя из вышесказанного актуальной является задача распространения опыта эксплуатации общепромышленных энергетических объектов на эксплуатацию перспективного КЗ РН СПГ с учетом вышеописанных особенностей воздействия поражающих факторов на объекты безопасности (в число которых входит сама РН) и создания для него модели воздействия опасных факторов.

ПРОБИТ-АНАЛИЗ В ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ВЗРЫВА СПГ С ВОЗДУХОМ

Существуют различные методики определения поражающих факторов и функций воздействия их на объекты безопасности [5]. Известно, что в общем случае одна и та же мера воздействия (плотность лучистого теплового потока или давление во фронте ударной волны) может вызвать последствия различной степени тяжести для объектов безопасности, т. е. эффект поражения носит вероятностный характер. Величина поражения (измеряется в долях единицы или процентах) выражается функцией Гаусса (функцией ошибок), которую можно записать в виде

$$P = f(\mathrm{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} e^{-\frac{Pr^2}{2}} d\mathrm{Pr}, \quad (1)$$

где Pr – пробит-функция. Верхний предел интегральной функции (1) является так называемой пробит-функцией, отражающей связь между вероятностью нанесения ущерба и поглощенной дозой поражающего фактора.

Пробит-функция (от англ. *probability unit* – вероятностная единица) является результатом пробит-анализа – специфического метода статистического анализа влияния воздействующего фактора на рассматриваемый субъект воздействия в зависимости от интенсивности воздействия (логарифма дозы), основанный на нормальном статистическом распределении случайной величины [6]. Такой подход позволяет экстраполировать полученные результаты на все возможные объекты безопасности.

Анализируемый показатель – бинарный качественный признак (есть эффект или нет эффекта), оцениваемый по частоте встречаемости эффекта. В качестве такого эффекта может выступать летальное поражение персонала либо достижение какого-либо заданного уровня выраженности признака (например, болевые реакции или получение травм персоналом различной степени тяжести).

Источником статистических данных является опыт эксплуатации различных производственных объектов. В нашем случае это отечественный и зарубежный опыт эксплуатации общепромышленных объектов, оснащенных криогенными системами производства, хранения, транспортировки сжиженных энергоносителей, таких как СПГ (и других легких углеводородов), жидкого водорода [7–9].

Пробит-функция может быть вычислена по уравнению вида

$$\mathrm{Pr} = a + b \cdot \ln(D), \quad (2)$$

где a и b – константы для каждого вещества или процесса, характеризующие специфику и меру опасности его воздействия;

D – поглощенная субъектом доза негативного воздействия.

Связь вероятности нанесения ущерба объектам безопасности с пробит-функцией приведена в табл. 1. Здесь, в зависимости от значения пробит-функции, определяется вероятность события, исчисляемая десятками процентов, а в строках – единицами процентов. Так, например, если пробит-функция принимает значение 4,61, то вероятность свершения исследуемого события будет соответствовать 35%. Последняя строка позволяет таким образом определить десятые доли процента для вероятностей событий более 99%.

Таблица 1

Связь вероятности нанесения ущерба объектам безопасности со значением пробит-функции

P, %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Следовательно, для определения вероятности нанесения ущерба объектам безопасности целесообразно рассмотреть по отдельности пробит-функции, позволяющие оценить ударное (барическое) и тепловое (термическое) воздействия от взрыва гомогенной смеси СПГ с воздухом.

ОЦЕНКА БАРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА СПГ-ВОЗДУШНОГО ГОРЮЧЕГО ОБЛАКА

Произвести количественную оценку параметров ударного (барического) воздействия при взрыве гомогенного горючего облака СПГ с воздухом возможно на основании методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах, изложенной в нормативном документе [10]. Это методика базируется на известном физико-математическом аппарате описания процессов горения топливно-воздушных смесей в различных режимах [11, 12], на статистике последствий аварийных событий, произошедших как на отечественных, так и на зарубежных промышленно-опасных объектах, а также на отчетах о НИР, выполненных НТЦ «Промышленная безопасность».

В начале проведения расчетов определяется эффективный энергозапас горючей смеси E по соотношению

$$E = m_{\text{г}} \cdot q_{\text{г}}, \text{ при } C_{\text{г}} \le C_{\text{ст}}, \quad (3)$$

или

$$E = m_{\text{г}} \cdot q_{\text{г}} \cdot \frac{C_{\text{ст}}}{C_{\text{г}}}, \text{ при } C_{\text{г}} > C_{\text{ст}}, \quad (4)$$

где $m_{\text{г}}$ – масса СПГ, содержащаяся в горючей смеси с воздухом, кг;
$q_{\text{г}}$ – теплота сгорания СПГ в воздухе, МДж/кг;
$C_{\text{г}}$ – концентрация СПГ в облаке горючей смеси с воздухом, кг/м^3;
$C_{\text{ст}}$ – стехиометрическая концентрация СПГ с воздухом, кг/м^3.

Если температура паров СПГ составляет около -150ºС или в пределах зоны воспламенения оказывается жидкий компонент, то возможно образование гетерогенного горючего облака, которое будет тяжелее воздуха и будет располагаться на поверхности земли. В этом случае величина эффективного энергозапаса, рассчитываемая по формулам (3) и (4), удваивается. В нашем случае будем считать, что горючее облако приобрело температуру окружающей среды практически сразу.

Для определения объема горючего облака можно воспользоваться соотношением

$$V = \frac{m_{\text{г}}}{C_{\text{ст}}}. \quad (5)$$

Стехиометрическую концентрацию $C_{\text{ст}}$ можно определить, исходя из соображений, что ракетный СПГ представляет собой в основном метан и стехиометрическая концентрация СПГ в составе горючего облака – это такая масса СПГ в объеме смеси с воздухом, при инициации которой в нормальных условиях (давление 10^5 Па и температура 20°С) образуются полные продукты сгорания (углекислый газ CO_2, азот N_2 и вода H_2O).

Таким образом, можно составить схему окислительно-восстановительного химического процесса сгорания СПГ в воздухе:

$$A \cdot CH_4 + B \cdot O_zN_k = \beta_1 \cdot CO_2 + \beta_2 \cdot N_2 + \beta_3 \cdot H_2O, \quad (6)$$

где A и B – стехиометрические коэффициенты при исходных веществах, образующих горючее облако;
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – стехиометрические коэффициенты при продуктах полного взаимодействия СПГ с воздухом;
O_zN_k – условная химическая формула воздуха.

Совершенно очевидно, что СПГ в схеме (6) будет выполнять роль горючего, восстановителя [13]. Воздух же представляет собой газовую смесь, основными компонентами которой являются кислород и азот. Содержанием воды, аргона, углекислого газа и других газов с низкой концентрацией можно пренебречь. Окислительным элементом воздуха является кислород. Но ввиду значительно большего содержания в воздухе азота необходимо учесть и его влияние на формирование стехиометрической концентрации, которая будет отличаться по этой причине от стехиометрической концентрации метана в чистом кислороде.

Условную химическую формулу рассчитываем из соображений, что объемные доли кислорода и азота равны соответственно:

$$r_{O_2} = 0{,}21 \text{ и } r_{N_2} = 0{,}79.$$

Следовательно, молекулярная масса воздуха $\mu_в = 28{,}84\ ^{г}/_{моль}$. Массовые доли газов в воздухе будут следующими:

$$\omega_{O_2} = 0{,}23 \text{ и } \omega_{N_2} = 0{,}77.$$

Индексы z и k при символах элементов в условной химической формуле воздуха можно определить следующим образом:

$$z = \frac{\omega_{O_2} \cdot \mu_в}{\mu_O} = \frac{0{,}23 \cdot 28{,}84}{16} = 0{,}41;$$

$$k = \frac{\omega_{N_2} \cdot \mu_в}{\mu_N} = \frac{0{,}77 \cdot 28{,}84}{14} = 1{,}59.$$

В результате условная химическая формула воздуха будет иметь вид $O_{0,41}N_{1,59}$.

С учетом принятых правил определения стехиометрических коэффициентов [13], схема химического процесса горения СПГ в воздухе (6) перепишется в виде уравнения химической реакции

$$0{,}41 \cdot CH_4 + 4 \cdot O_{0,41}N_{1,59} = 0{,}41 \cdot CO_2 + 3{,}18 \cdot N_2 + 0{,}82 \cdot H_2O. \quad (7)$$

Коэффициенты 0,41 и 4 при СПГ и воздухе соответственно отражают мольное стехиометрическое соотношение. Зная молярную массу СПГ ($\mu_{СПГ} = 16\ ^{г}/_{моль}$) и молярную массу воздуха, нетрудно посчитать массовое стехиометрическое соотношение этих веществ: $m_{СПГ} = 6{,}56$ г и $m_в = 115{,}36$ г. Следовательно, массовые доли СПГ и воздуха в составе стехиометрического горючего облака будут составлять: $\omega_{СПГ} = 0{,}054$ и $\omega_в = 0{,}946$, а объемные доли – $r_{СПГ} = 0{,}093$ и $r_в = 0{,}907$ соответственно.

Если принять общий объем стехиометрического горючего облака равным 1м^3, а плотность газообразного СПГ при нормальных условиях – $0{,}668\ ^{кг}/_{м^3}$, то стехиометрическая концентрация СПГ в этом облаке составит $C_{ст} = 0{,}062\ ^{кг}/_{м^3}$.

В случае, если определение концентрации СПГ в горючем облаке затруднено, в качестве величины $C_г$ в соотношениях (3) и (4) принимается концентрация, соответствующая нижнему пределу воспламенения СПГ (метана) в воздухе, равная 4,4% по объему [14]. Нетрудно определить, что $C_г = 0{,}03\ ^{кг}/_{м^3}$ при нормальных условиях.

Для определения удельной теплоты сгорания СПГ в составе стехиометрического облака (плотности теплового потока) $q_г$ можно воспользоваться первым следствием из закона Г. И. Гесса [15] или эмпирической формулой, применяемой для оценки теплот, образующихся при сгорании различных пожароопасных веществ в теории промышленной безопасности [10]

$$q_г = 44\beta\ \left[\frac{МДж}{кг}\right], \quad (8)$$

где β – корректировочный параметр.

Значения параметра β приведены в работе [10] для наиболее распространенных в промышленном производстве опасных веществ. Для СПГ $\beta = 1{,}14$. Следовательно, удельная теплота сгорания для СПГ составляет $q_г \approx 5{,}02 \cdot 10^7$ $^{Дж}/_{кг}$.

В практике промышленной безопасности [10] СПГ (метан) по своим взрывоопасным свойствам относится к 4-му классу – к слабочувствительным веществам [11].

В связи с тем, что характер окружающего пространства в значительной степени определяет скорость взрывного превращения горючего облака и, следовательно, параметры ударной волны, в практике промышленной безопасности существует классификация окружающей территории, где потенциально возможно формирование горючего облака. По этой классификации СК, на котором расположен КЗ РН СПГ, вполне возможно отнести к территории 3-го вида. Такая территория предполагает среднюю загроможденность окружающей местности. На ней могут находиться отдельно стоящие установки различного технологического оборудования, здания и сооружения, резервуарный парк. Трубопроводы подачи СПГ на такой территории размещены на открытом пространстве.

Известно два основных режима протекания взрывного процесса – детонация и дефлаграция. Исходя из вышеприведенных характеристик окружающего пространства и СПГ-воздушного горючего облака, при его инициации следует ожидать дефлаграционный режим взрывного превращения со скоростью фронта пламени, определяемой по соотношению

$$v_г = k \cdot m_г^{1/6}. \quad (9)$$

где k – константа, равная 43.

После того как определен вероятный режим взрывного превращения, рассчитываются основные параметры воздушных ударных волн (избыточное давление Δp и импульс волны давления I) в зависимости от расстояния до центра облака. Для этого предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по соотношению

$$R_x = \frac{R}{\left(\frac{E}{p_0}\right)^{1/3}}, \quad (10)$$

где R – расстояние от объекта воздействия до точки на поверхности земли непосредственно под центром горючего облака (удаленность объекта безопасности от эпицентра взрыва), м.;

p_0 – атмосферное давление, Па.

Затем определяются безразмерное давление p_x и безразмерный импульс фазы сжатия I_x путем выбора из следующих условий:

$$p_x = \min\ (p_{x1}, p_{x2});\ I_x = \min\ (I_{x1}, I_{x2}), \quad (11)$$

где p_{x1} – безразмерное давление, соответствующее дефлаграционному режиму протекания взрывного процесса; p_{x1} находится при помощи следующей формулы:

$$p_{x1} = \left(\frac{v_г}{c_0}\right)^2 \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \cdot \left(\frac{0{,}83}{R_x} - \frac{0{,}14}{R_x^2}\right); \quad (12)$$

где σ – степень расширения продуктов горения, для СПГ-воздушных гомогенных смесей $\sigma = 7$;

c_0 – скорость звука в воздухе, $c_0 = 340$ $^{м}/_{с}$.

p_{x2} – безразмерное давление, соответствующее детонационному режиму протекания взрывного процесса;

I_{x1} – безразмерный импульс фазы сжатия, соответствующий дефлаграционному режиму протекания взрывного процесса;

I_{x2} – безразмерный импульс фазы сжатия, соответствующий детонационному режиму протекания взрывного процесса.

Для нахождения I_{x1} применяют следующее выражение:

$$I_{x1} = \left(\frac{v_г}{c_0}\right)^2 \cdot \frac{\sigma-1}{\sigma} \cdot \left(1 - 0{,}4 \cdot \frac{v_г}{c_0} \cdot \frac{\sigma-1}{\sigma}\right) \cdot \left(\frac{0{,}06}{R_x} + \frac{0{,}01}{R_x^2} - \frac{0{,}0025}{R_x^3}\right). \quad (13)$$

Выражения (12) и (13) справедливы для значений $R_x \geq 0{,}34$, в противном случае в эти выражения подставляется $R_x = 0{,}34$.

В случае детонации горючего гомогенного облака, p_{x2} и I_{x2} определяются так:

$$p_{x2} = \exp\left(-1{,}124 - 1{,}66\ln(R_x) + 0{,}26 \cdot \left(\ln(R_x)\right)^2\right). \quad (14)$$

$$I_{x2} = \exp\left(-3{,}4217 - 0{,}898\ln(R_x) + 0{,}0096 \cdot \left(\ln(R_x)\right)^2\right). \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) справедливы для значений $0{,}2 \leq R_x \leq 24$. Для значений $R_x < 0{,}2$ величина $p_{x2} = 18$, а в выражение (15) подставляется значение $R_x = 0{,}142$.

После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия вычисляются соответствующие им размерные величины перепада давления во фронте ударной волны Δp и импульса волны давления I по следующим формулам:

$$\Delta p = p_x \cdot p_0 \text{ [Па]}; \quad (16)$$

$$I = 10 \cdot \frac{I_x \cdot E^{1/3} \cdot p_0^{2/3}}{c_0} \text{ [Па·с]}. \quad (17)$$

Теперь появляется возможность оценить воздействие найденных поражающих факторов на объекты безопасности при помощи значений пробит-функций.

Так, вероятность летального исхода персонала, попавшего в зону действия ударной волны при взрыве СПГ-воздушного облака, может быть оценена по величине следующей пробит-функции [16,17]:

$$\mathrm{Pr}_1 = 5 - 5{,}74\ln V_1, \quad (18)$$

где V_1 – фактор опасности.

Фактор опасности V_1 рассчитывается по соотношению

$$V_1 = \frac{4{,}2}{\bar{p}} + \frac{1{,}3}{\bar{\imath}}, \quad (19)$$

где $\bar{p}$ – безразмерное давление;

$\bar{\imath}$ – приведенный импульс.

Параметры $\bar{p}$ и $\bar{\imath}$ рассчитываются при помощи следующих выражений:

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta p}{p_0}; \quad (20)$$

$$\bar{\imath} = \frac{I}{p_0^{1/2} \cdot m^{1/3}}, \quad (21)$$

где m – масса тела живого организма, кг.

В источнике [17] приводится пробит-функция, позволяющая оценить вероятность нелетального поражения персонала, вызванного разрывом барабанных перепонок в зависимости от уровня перепада давления в воздушной волне:

$$\mathrm{Pr}_2 = -12{,}6 + 1{,}524 \ln \Delta p. \quad (22)$$

Также в работах [16, 17] приводится возможность определения вероятности нелетального поражения персонала, вызванного отбросом человека волной давления, при помощи следующей пробит-функции:

$$\mathrm{Pr}_3 = 5 - 2{,}44 \ln V_3. \quad (23)$$

Здесь фактор V_3 рассчитывается из соотношения

$$V_3 = \frac{7{,}38 \cdot 10^3}{\Delta p} + \frac{1{,}3 \cdot 10^9}{\Delta p \cdot I}. \quad (24)$$

Для оценивания вероятности нанесения ущерба соседствующему с КЗ РН СПГ технологическому оборудованию (по аналогии с промышленными постройками), при котором возможно его восстановление, производится по соотношению [17]

$$\mathrm{Pr}_4 = 5 - 0{,}26 \ln V_4 \quad (25)$$

Здесь фактор V_4 рассчитывается с учетом перепада давления в волне и импульса статического давления по соотношению

$$V_4 = \left(\frac{17500}{\Delta p}\right)^{8{,}4} + \left(\frac{290}{I}\right)^{9{,}3}. \quad (26)$$

Вероятность разрушения технологического оборудования, при котором оно восстановлению не подлежит (постройки подлежат сносу) оценивается по соотношению

$$Pr_5 = 5 - 0{,}22 \ln V_5 \quad (27)$$

В этом случае фактор V_5 рассчитывается по формуле

$$V_5 = \left(\frac{40000}{\Delta p}\right)^{7{,}4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11{,}3}. \quad (28)$$

Определить вероятности соответствующих событий по значениям пробит-функций возможно при помощи табл. 1. Если пробит-функция имеет отрицательное значение, то вероятность такого события равна нулю.

ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА СПГ-ВОЗДУШНОГО ГОРЮЧЕГО ОБЛАКА

Решение задачи определения вероятности нанесения ущерба объектам безопасности при термическом воздействии инициированного гомогенного горючего облака потребовало провести анализ источников, посвященных исследованиям процессов газового смесеобразования при различных видах разгерметизации элементов гидравлических криогенных систем, предназначенных для транспортировки сжиженных легких углеводородных газов [18–21, 5, 7, 8]. В результате можно предвидеть типовой сценарий формирования СПГ-воздушного горючего облака, например, при отказе (разрыве) такого элемента ГС КЗ РН СПГЮ как трубопровод подачи компонента.

На начальном этапе разрушение элемента ГС КЗ РН СПГ приведет к скоротечному выходу всей массы жидкости, находящейся в элементе ГС под давлением. Затем последует создание аэрозольной дисперсной системы, где дисперсная фаза будет представлять собой различные по объему капельки СПГ. Объем и форма первоначально образующихся аэрозольных облаков существенно зависят от характера разрушения элемента ГС. При мгновенном полном разрушении трубопровода облако имеет сферическую форму. Образование трещин в элементе ГС обуславливает строгую направленность струи газо-паро-жидкостной среды и придает облаку плоскую или вытянутую форму.

Из-за криогенной температуры СПГ дисперсная фаза будет активно газифицироваться, причем возможное воспламенение аэрозоля только ускорит этот переход. В итоге выход СПГ за пределы элементов ГС сформирует облако газа, смешанного с воздухом, но переобогащенное компонентом и поэтому неспособное (как было отмечено выше) объемно детонировать. Это облако начинает гореть вокруг своей внешней оболочки, образуя так называемый «огненный шар». Такие «огненные шары» крайне опасны. Ввиду избыточности СПГ, в продуктах сгорания образуется молекулярный углерод, который даст сильное свечение в ИК-диапазоне. Поэтому «огненный шар» будет излучать тепло, которое может привести к ожоговому поражению живых организмов, воспламенению технологического оборудования, зданий и сооружений, горючей флоры окружающей среды. «Огненный шар» будет подниматься и перемещаться под действием воздушных потоков, образуя грибовидное облако, «ножка» которого – это сильное восходящее конвективное течение. Оно может всасывать отдельные предметы, зажигать их и разбрасывать горящие предметы на большие площади.

После окончательного формирования и отрыва от земли «огненный шар» подпитывается воздухом за счет конвективных сил, что увеличивает его массу. После достижения стехиометрического состава смеси вовлекаемый воздух нагревает реагенты, что приводит к полному выгоранию СПГ. Температура в эпицентре СПГ-воздушного «огненного шара» может доходить до 1500ºС [19].

Продолжительность горения и размеры «огненных шаров» определяются общей массой СПГ в элементе ГС в момент его разрушения. В практике эксплуатации промышленных объектов, предназначенных для получения, хранения и транспортировки сжиженных углеводородов, известны аварии, породившие «огненные шары», которые охватили поверхность земли в радиусе до 60 м с воспламенением горючих материалов в радиусе 350 м.

Из вышесказанного ясно, что выход СПГ за пределы элементов ГС КЗ приведет к образованию горючего облака, которое инициируется в виде «огненного шара». «Огненный шар», в свою очередь, формирует лучистый тепловой поток, плотность которого можно определить по формуле [20]

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}\right], \tag{29}$$

где E_f – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, $^{\text{кВт}}/_{\text{м}^2}$;
F_q – угловой коэффициент облученности;
τ – коэффициент пропускания атмосферы.

Величина E_f определяется на основе экспериментальных исследований. Допускается принимать E_f равной 350 $^{\text{кВт}}/_{\text{м}^2}$.

Значение F_q определяется по формуле

$$F_q = \frac{D_s^2}{4 \cdot (H^2 + R^2)}, \tag{30}$$

где H – высота центра «огненного шара», м;
D_s – эффективный диаметр «огненного шара», м;
R – расстояние от объекта воздействия до точки на поверхности земли непосредственно под центром горючего облака («огневого шара»), м.

Для определения эффективного диаметра «огненного шара» применяется формула

$$D_s = 6{,}48 \cdot m_{\text{г}}^{0{,}325} \text{ [м]}. \tag{31}$$

Величину H допускается принимать равной D_s.

Коэффициент пропускания атмосферы τ для «огненного шара» рассчитывается по следующей формуле:

$$\tau = \exp\left[-7 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\sqrt{H^2 + R^2} - \frac{D_s}{2}\right)\right]. \quad (32)$$

Время существования «огненного шара», т. е. длительность термического воздействия на объекты безопасности, t_s определяется по формуле

$$t_s = 0{,}852 \cdot m_{\text{т}}^{0{,}26} \text{ [с]}. \quad (33)$$

Далее появляется возможность рассчитать индекс облучения I_s – термодинамический критерий, используемый в пробит-функциях для прогнозирования вероятности возникновения термических ожогов у живых организмов:

$$I_s = (q \cdot 10^3)^{4/3} \cdot t_s. \quad (34)$$

Для определения вероятности летального поражения живых организмов в источнике [5] предлагают воспользоваться следующей пробит-функцией:

$$Pr_6 = -14{,}9 + 2{,}56 \cdot \ln I_s. \quad (35)$$

Очевидно, что последствиями термического воздействия на персонал будут являться ожоги. В работе [21] при оценке рисков предлагается дифференцировать санитарные потери по степени тяжести. Вероятность поражения персонала ожогами различных степеней можно рассчитать при помощи следующих пробит-функций.

Для поражения ожогами III степени

$$\text{Pr}_7 = -12{,}6 + 2{,}99 \cdot \ln I_s. \quad (36)$$

Для поражения ожогами II степени

$$\text{Pr}_8 = -11{,}4 + 2{,}99 \cdot \ln I_s. \quad (37)$$

Для поражения ожогами I степени

$$\text{Pr}_9 = -9{,}16 + 2{,}99 \cdot \ln I_s. \quad (38)$$

Болевой порог от термического воздействия оценивается как

$$\text{Pr}_{10} = -8{,}74 + 2{,}99 \cdot \ln I_s. \quad (39)$$

Что же касается термического воздействия на другие объекты безопасности, такие как различное технологическое оборудование, здания и сооружения, флора окружающей среды (лесные массивы, другая растительность), то оно будет определяться способностью материалов, из которых создан конкретный объект, противостоять термической нагрузке и не воспламеняться от текущего теплового потока, рассчитанного по формуле (29).

Отдельно следует рассмотреть термическое воздействие «огненного шара» на такой объект безопасности, как РН, если взрыв произошел на этапе его заправки. При этом стоит учесть то обстоятельство, что на момент взрыва СПГ-воздушного горючего облака баки РН могут быть уже заполнены установленной дозой окислителя (жидким кислородом) и могут уже иметь какой-то уровень заполнения бака горючего.

Если принять, что алюминиевый сплав, из которого изготовлен корпус РН, являющийся обечайкой баковых отсеков, практически не препятствует внешнему теплопритоку, то сформированный взрывом тепловой поток полностью будет поглощаться криогенными КРТ. Это тепло резко ускорит фазовый переход КРТ на внутренней поверхности бака со стороны облучения. Вполне вероятно, что проходное сечение сработавшего дренажно-предохранительного клапана, которым оборудован бак, не будет справляться с удалением прибывающей паровой фазы КРТ, особенно в том случае, если бак заполнен полностью [24]. Следствием этих событий станет заброс давления в газовой полости баков РН.

Таким образом, представляет интерес оценка вероятности разрушения корпуса РН P_{11} вследствие избыточного давления в газовой полости баковых отсеков под действием лучистого теплового потока.

Для проведения такой оценки определяется удельная теплота, поступающая к КРТ, находящемуся в баках РН, по формуле

$$Q_{б} = q \cdot t_s \left[\frac{кДж}{м^2}\right]. \quad (40)$$

Затем определяется удельный массовый приход паровой фазы КРТ с единицы площади облучаемой поверхности корпуса РН:

$$m_{уд} = \frac{Q_{б}}{r} \left[\frac{кг}{м^2}\right], \quad (41)$$

где r – удельная теплота фазового перехода, кДж/кг.

Для жидкого кислорода, при температуре в баке РН 90 К, $r_{O_2} = 212{,}5 \frac{кДж}{кг}$, а для СПГ при 105 К – $r_{СПГ} = 531 \frac{кДж}{кг}$ [25].

На следующем шаге определяется масса паров КРТ, образовавшихся из-за поглощения им лучистого теплового потока, в зависимости от заполненности бака. Считаем, что если бак РН заполнен установленной дозой КРТ, то остаточный объем газовой полости составляет 5% от всего объема бака. Также допускаем, что поверхность бака РН, облучаемая тепловым потоком, является плоской. Тогда

$$m_{пф} = m_{уд} \cdot D_{б} \cdot h_{б} \cdot \frac{(100-\eta_{пф})}{100} \text{ [кг]}, \quad (42)$$

где $D_{б}$ – диаметр бака РН, м;
$h_{б}$ – высота бака РН, м.
$\eta_{пф}$ – текущий объем газовой полости бака РН, выраженный в процентах от его полного объема, %.

Объем газовой полости бака РН определяется исходя из уровня его заправки КРТ. Значит,

$$V_{пф} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_{б} \cdot \frac{\eta_{пф}}{100} \text{ [м}^3\text{]}. \quad (43)$$

Заброс давления в баке РН определяется с использованием уравнения состояния

$$\Delta p_{б} = m_{пф} \cdot \frac{R \cdot T}{V_{пф}} \text{ [Па]}, \quad (44)$$

где R – газовая постоянная КРТ, Дж/кг·К;
T – температура КРТ в баке РН, К.

Газовые постоянные для кислорода и СПГ равны: $R_{O_2} = 259{,}8 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ и $R_{спг} = 518{,}26 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ соответственно. Тогда давление, создавшееся после облучения, можно определить как сумму $\Delta p_{б}$ с давлением, которое уже имелось в газовой полости бака до этого, т. е. с давлением наддува:

$$p_{б} = p_{над} + \Delta p, \text{ [Па]}, \quad (45)$$

где $p_{над}$ – давление наддува бака, Па.

Если считать, что в ходе заправки в газовой полости находится под атмосферным давлением, то в случае облучения бака в нем установится давление $p_{б} = \Delta p$.

Для оценки вероятности разрушения корпуса РН можно придерживаться следующей логики рассуждений. Если выполняется условие

$$p_{б} \leq p_{расч}, \quad (46)$$

где $p_{расч}$ – расчетное разрушающее давление, Па, то вероятность разрушения бака РН $P_{11} = 0\%$.

Если выполняется условие

$$p_{\text{б}} \geq p_{\text{пр}}, \tag{47}$$

где $p_{\text{пр}}$ – предельное давление, которое способен выдержать корпус РН с учетом заложенного в него запаса прочности (в Па), то корпус РН однозначно будет разрушен, т. е. $P_{11} = 100\%$. Давление $p_{\text{пр}}$ определяется из следующих соображений:

$$p_{\text{пр}} = p_{\text{расч}} \cdot n \cdot f \ \text{[Па]}, \tag{48}$$

где n – запас прочности конструкции РН (принимается равным 1) [26],
f – коэффициент безопасности, в случаях обслуживания РН на СК считается равным 1,5.

Если выполняется условие

$$p_{\text{расч}} < p_{\text{б}} < p_{\text{пр}}, \tag{49}$$

то для оценивания вероятности P_{11} можно воспользоваться соответствующей пробит-функцией

$$\text{Pr}_{11} = 2{,}42 - 0{,}381 \cdot \ln \Delta\overline{p_{\text{б}}}, \tag{50}$$

где $\Delta\overline{p_{\text{б}}}$ – фактор опасности РН, Па.

Фактор опасности $\Delta\overline{p_{\text{б}}}$ определяется по формуле

$$\Delta\overline{p_{\text{б}}} = \frac{p_{\text{пр}} - p_{\text{б}}}{p_{\text{пр}}}. \tag{51}$$

Определив значение пробит-функций $Pr_6 - Pr_{11}$, следующим шагом, при помощи табл. 1, производится определение вероятности нанесения ущерба рассмотренным объектам безопасности $P_6 - P_{11}$ в зависимости от массы вышедшего за пределы элементов ГС КЗ и вступившего в реакцию СПГ $m_{\text{г}}$ и расстояния R от эпицентра образования «огненного шара».

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕРМОБАРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА СПГ-ВОЗДУШНОГО ГОРЮЧЕГО ОБЛАКА

Предположим, что при выполнении КЗ РН СПГ произошло событие (разрыв трубопровода или разрыв сильфонного уплотнения запорно-регулирующей арматуры), вследствие которого компонент вышел за пределы элемента ГС и сформировалось СПГ-воздушное горючее облако, которое было инициировано каким-либо образом. Результатом такого события является взрыв. Последовательность определения вероятностей нанесения ущерба объектам безопасности поражающими факторами, сформированными этим взрывом, можно представить в виде алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 1.

Для начала расчета необходимо задаться исходными данными. Их условно можно разделить на три группы. К *первой группе* отнесем данные, характеризующие физико-химические свойства КРТ и горючего облака. Это масса СПГ, создавшая горючее облако $m_{\text{г}}$; стехиометрическое соотношение СПГ с воздухом $C_{\text{ст}}$; концентрация СПГ в воздухе $C_{\text{г}}$, за которую можно принять нижний концентрационный предел воспламенения СПГ в составе воздуха; степень расширения продуктов горения, для СПГ-воздушных гомогенных смесей $\sigma = 7$; удельные теплоты фазовых переходов КРТ r_{O_2} и $r_{\text{спг}}$; удельные объемы на линии насыщения КРТ v''_{O_2} и $v''_{\text{спг}}$; температуры в баках окислителя и горючего РН T_{O_2} и $T_{\text{спг}}$.

Ко *второй группе* относятся данные, характеризующие объекты безопасности. В рамках этой группы задаемся средней массой тела человека m; расстоянием от объекта воздействия до точки на поверхности земли непосредственно под центром горючего облака R, т. е. отдалением объекта безопасности от эпицентра взрыва; диаметрами баковых отсеков РН $D_{\text{б}}^{\text{о}}$ и $D_{\text{б}}^{\text{г}}$;

длинами баковых отсеков РН $h_б^о$ и $h_б^г$; текущими объемами газовой полости баков РН, выраженных в процентах от его полного объема, $\eta_{пф}^о$ и $\eta_{пф}^г$; давлением срабатывания ДПК баков $p_{дпк}$ (будем считать, что $p_{дпк} = 2 \cdot 10^5$Па для всех баков РН); также зададимся запасом прочности конструкции РН $n = 2$ и коэффициентом безопасности, в случае обслуживания РН на СК $f = 1{,}5$.

В рамках *третьей группы* задаемся характеристиками окружающей среды, а именно: скоростью звука в воздухе, $c_0 = 340$ $^м/_с$; корректировочным параметром для определения удельной теплоты сгорания СПГ в составе воздуха, $\beta = 1{,}14$; константой скорости распространения пламени, $k = 43$; атмосферным давлением, $p_0 = 10^5$Па, и среднеповерхностной интенсивностью теплового излучения пламени, $E_f = 350$ $^{кВт}/_{м^2}$.

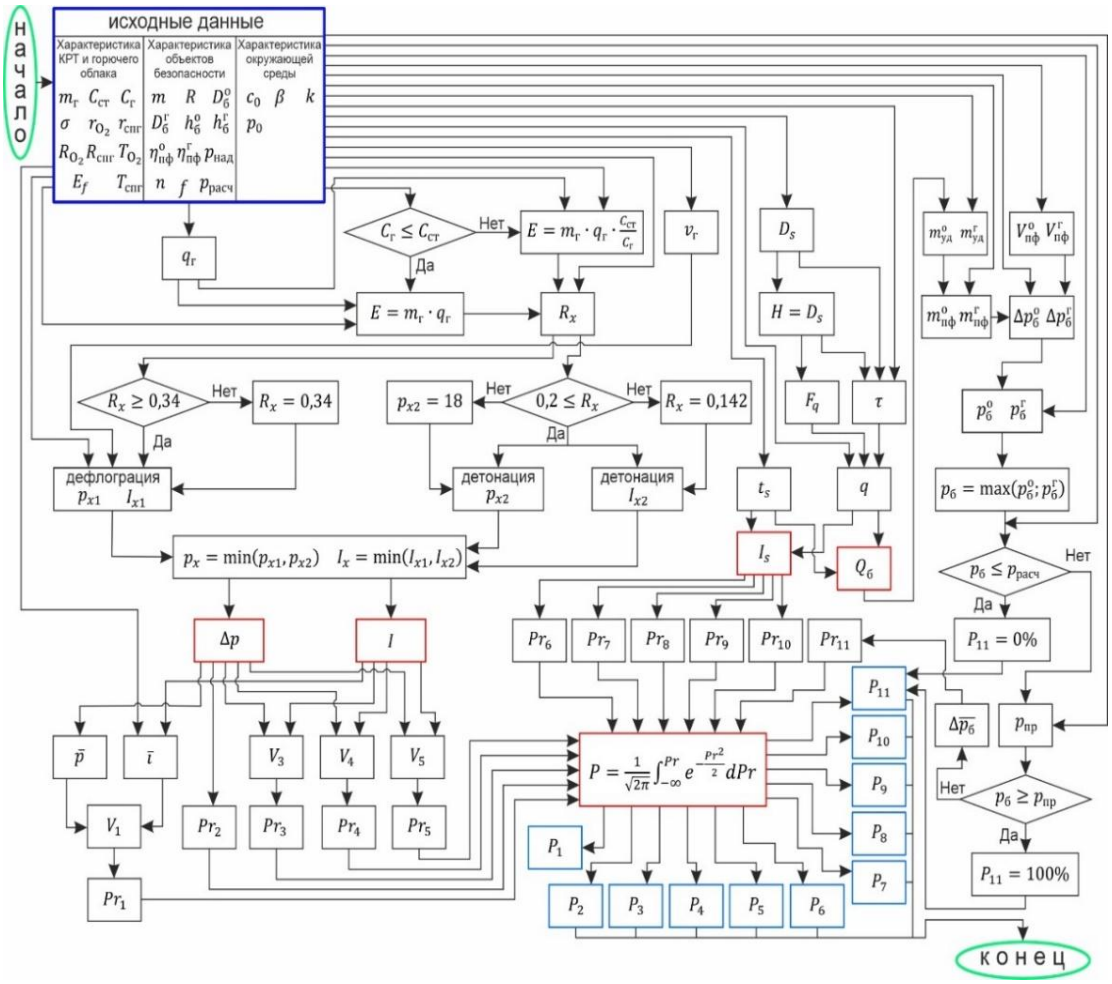


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения термобарического воздействия инициации СПГ-воздушного горючего облака на объекты безопасности при эксплуатации КЗ РН СПГ

Теперь переходим непосредственно к расчетам. На первом их этапе определяется удельная теплота сгорания $q_г$ по формуле (8) и эффективный диаметр «огненного шара» D_s, образовавшегося от инициации горючего облака, по формуле (31). Затем определяется скорость распространения фронта пламени $v_г$ (9) и эффективный энергозапас облака E по формулам (3) или (4). Причем, если концентрация СПГ в облаке $C_г$ меньше или равна стехиометрической $C_{ст}$, то для расчета E используется формула (3), а если – нет, то – формула (4). В целом можно считать, что $C_г = C_{ст}$. Таким образом, по формуле (10) определяется безразмерное расстояние R_x, а высоту центра «огненного шара» H допускается считать равной D_s.

Следующий шаг состоит в определении безразмерного давления p_{x1} и p_{x2} и безразмерного импульса фазы сжатия I_{x1} и I_{x2} для дефлаграционного и детонационного режимов инициации горючего облака соответственно. Для этого применим формулы (12)–(15) в зависимости от условий, указанных на рис. 1. Параллельно этому рассчитываются угловой коэффициент облученности F_q и коэффициент пропускания атмосферы τ по формулам (30) и (32), а также время существования «огненного шара» t_s (33) и плотность лучистого теплового потока q (29).

Далее определяем удельную теплоту $Q_б$, которая поступает к КРТ, находящимся в баках РН, по формуле (40). Затем – удельный массовый приход паровой фазы окислителя $m^{о}_{уд}$ и горючего $m^{г}_{уд}$ и с единицы площади облучаемой поверхности корпуса РН по формуле (41). Параллельно по формуле (43) рассчитывается объем газовой полости в баках РН $V^{о}_{пф}$ и $V^{г}_{пф}$, исходя из уровня их заправки КРТ. Теперь по формуле (42) находим массы паров КРТ, образовавшихся из-за поглощения лучистого теплового потока, $m^{о}_{пф}$ и $m^{г}_{пф}$. На основании этого рассчитываем заброс давления в баках РН $\Delta p^{о}_{б}$ и $\Delta p^{г}_{б}$ по формуле (44), и по формуле (45) определяется полное давление в газовой полости баков $p^{о}_{б}$ и $p^{г}_{б}$, потом выбирается наибольшее из них.

Руководствуясь условиями (11), по формулам (16) и (17) определяются перепад давления во фронте ударной волны Δp и импульс волны давления I соответственно.

Рассчитав факторы опасности V_1, V_3, V_4 и V_5 по формулам (19), (24), (26) и (28) соответственно и индекс облучения I_s по формуле (34), переходим к определению значений пробитфункций $\mathrm{Pr}_1 \div \mathrm{Pr}_{10}$. Для этого используем формулы (18), (22), (23), (25), (27), (35), (36), (37), (38) и (39).

Для определения вероятности разрушения корпуса РН осуществляем следующие действия. Если выполняется условие (46), то $P_{11} = 0\%$, если нет, то определяется давление, которое способен выдержать корпус РН с учетом заложенного в него запаса прочности $p_{пр}$, по формуле (48) и проверяется условие (47). Если оно выполняется то считаем, что корпус РН разрушен, т. е. $P_{11} = 100\%$. Если условие (47) не выполняется, то рассчитывается по формуле (51) фактор опасности РН $\Delta\overline{p_б}$ и определяется значение Pr_{11} по формуле (50).

На завершающем этапе производим подсчет вероятностей ударного и термического воздействий от инициации СПГ-воздушного горючего облака на объекты безопасности, подставив полученные значения пробит функций в формулу (1) или сопоставив эти значения со значениями из табл. 1.

ОЦЕНИВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЕРМОБАРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА СПГ-ВОЗДУШНОГО ГОРЮЧЕГО ОБЛАКА

Предположим, что при проведении технологических операций КЗ РН СПГ произошло событие, которое привело к выходу компонента за пределы элемента ГС. Например, произошел полный поперечный разрыв секции трубопровода внутренним диаметром 200 мм (ДУ-200) и длиной 10 м. Вместе с тем будем считать, что отсечная автоматика во избежание гидравлического удара и повреждения других элементов ГС, перекрыла трубопровод в течение 30 с. За это время из поврежденного трубопровода вышло в окружающую среду 133 кг СПГ. Из статистики известно, что в подобных ситуациях доля компонента, вступившего в реакцию, составляет 0,1 [22], т. е. масса СПГ, вступившая в реакцию, в горючем облаке будет $m_г = 13{,}32$ кг. Кроме того, допустим, что горюче облако было инициировано непосредственно в месте разрыва трубопровода.

Воспользуемся приведенным алгоритмом для оценивания вероятностей нанесения ущерба объектам безопасности инициацией вышеописанного СПГ-воздушного горючего облака. Для

сравнения имеет смысл рассмотреть вероятности нанесения ущерба в случае 20 кг и 30 кг вступившего в реакцию СПГ.

Для начала рассмотрим воздействие ударной волной – барическое воздействие. На рис. 2 представлена графическая зависимость основного барического поражающего фактора – перепада давления во фронте ударной Δp – от расстояния от эпицентра взрыва R до объекта безопасности.

Кривая 1 отражает зависимость, полученную для рассматриваемого случая состава горючего облака. Кривые 2 и 3 получены для случаев, если инициируется в составе СПГ-воздушного облака 20 кг и 30 кг компонента соответственно. Из анализа этих зависимостей видно, что Δp продолжает сохранять начальное значение в радиусе 10–12 м от центра инициированного горючего облака. Далее, по мере увеличения R, Δp экспоненциально понижается и к 120 м приближается к величине суточного колебания атмосферного давления.

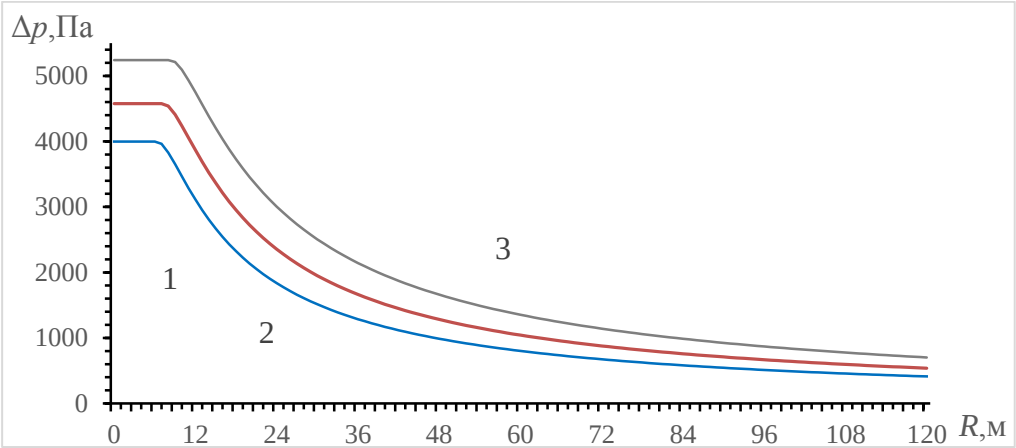


Рис. 2. Зависимость перепада давления во фронте ударной Δp от расстояния до объекта воздействия R:
1 – для $m_г$ = 13,32 кг; 2 – для $m_г$ =20 кг; 3 – для $m_г$ = 30 кг

Даже начальный перепад давления во фронте ударной волны Δp, сформированный при инициации 30 кг СПГ не представляет серьезной угрозы для объектов безопасности [23], что подтверждается расчетом соответствующих вероятностей поражения.

Так, для рассматриваемых составов горючих облаков пробит-функции Pr_1 и Pr_3 имеют отрицательные значения. Это означает, что вероятность летального поражения (состояния длительного нокдауна) от ударной волны составит $P_1 = 0\%$ и вероятность нелетального поражения, вызванного отбрасыванием персонала, также будет $P_3 = 0\%$, даже в том случае, если личный состав находится максимально близко к эпицентру взрыва.

На рис. 3 представлены зависимости $P_2 = f(R)$ для разных составов горючего облака. Судя по ним нелетальное поражение обслуживающего персонала, вызванное разрывом барабанных перепонок также маловероятно.

На рис. 4 представлены зависимости $P_4 = f(R)$ и $P_5 = f(R)$ для разных составов горючего облака. Их анализ показывает, что вероятность повреждений (как критических, так и некритических) технологического оборудования, сооружений СК, в том числе и корпуса РН, вызванных ударной волной, не превышают 1%, причем даже для объектов, находящихся непосредственно в зоне инициации СПГ-воздушного горючего облака.

Таким образом, можно сделать вывод, что взрыв СПГ-воздушного горючего облака на СК не нанесет ущерба объектам безопасности за счет барического воздействия.

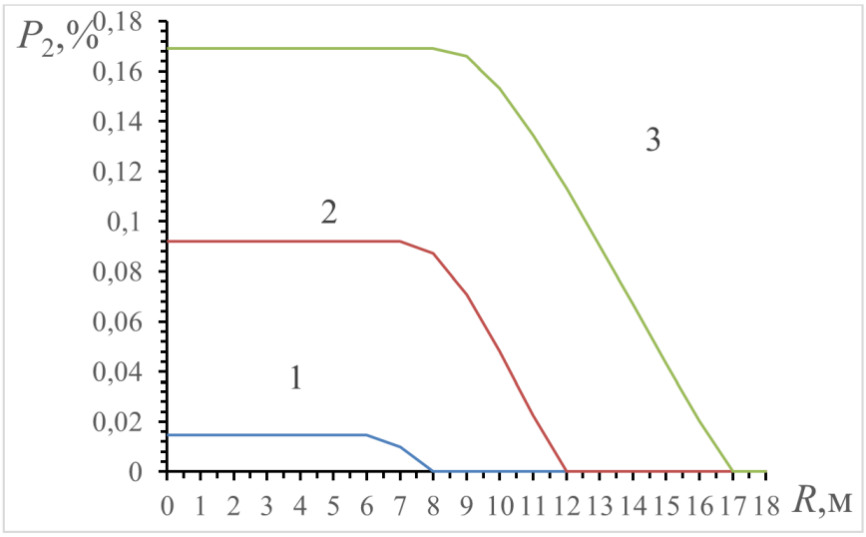
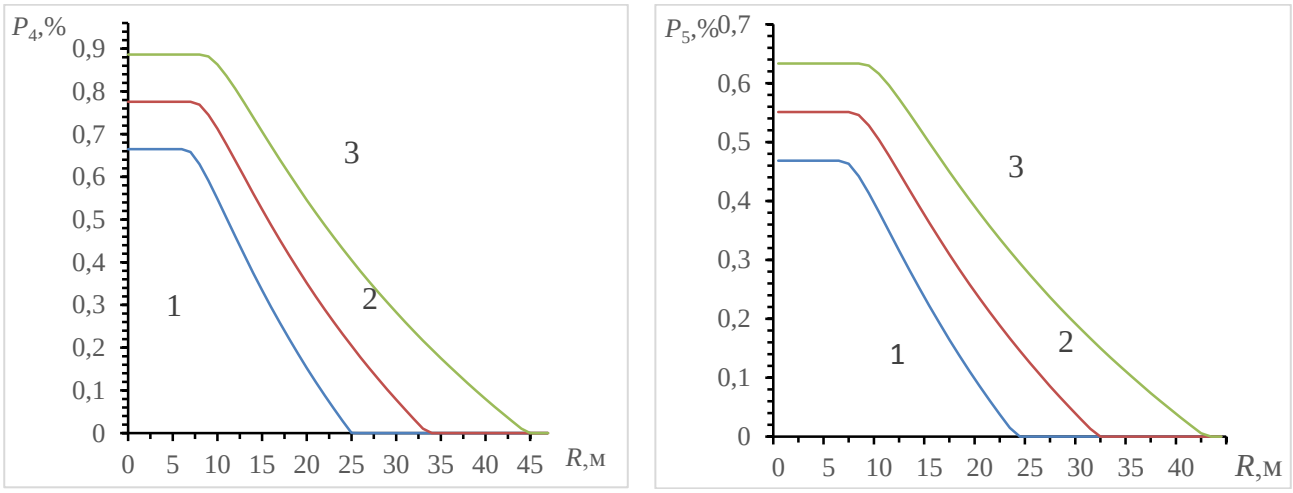


Рис. 3. Зависимость вероятности разрыва барабанных перепонок P_2 у персонала от расстояния до объекта воздействия R:
1 – для $m_г$ =13,32 кг; 2 – для $m_г$ =20 кг;
3 – для $m_г$ =30 кг



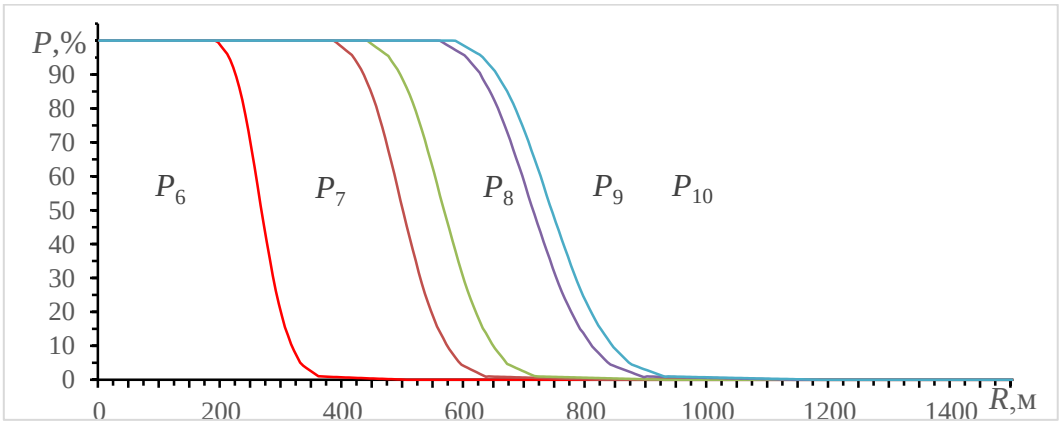
а) б)

Рис. 4. Зависимости вероятности разрушения систем и сооружений СК P_4 и P_5 от расстояния до объекта воздействия R:
а – $P_4 = f(R)$; б – $P_5 = f(R)$;
1 – для $m_г$ =13,32 кг; 2 – для $m_г$ =20 кг;
3 – для $m_г$ =30 кг

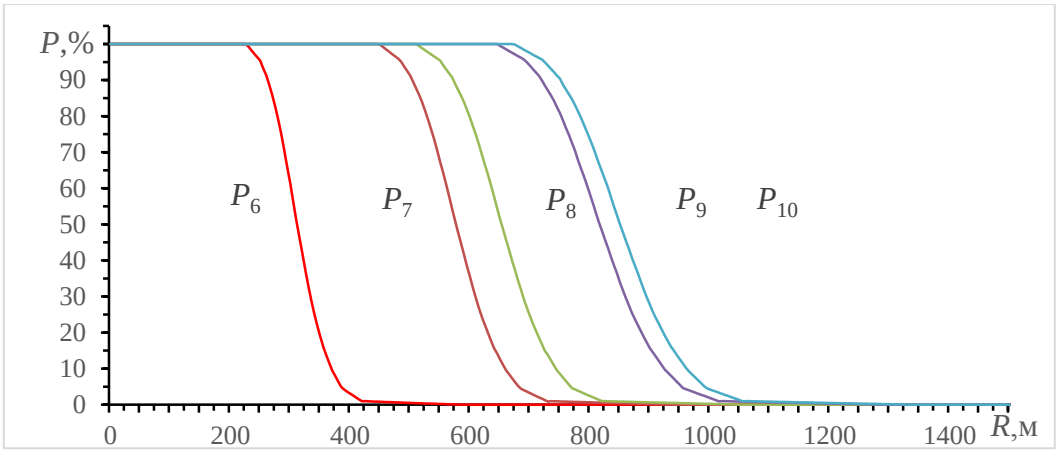
Теперь проанализируем термическое воздействие. На рис. 5 изображены зависимости вероятности летального поражения персонала от его удаленности от эпицентра взрыва $P_6 = f(R)$ и вероятностей нелетального поражения персонала от его удаленности от эпицентра взрыва, выраженного в получении личным составом ожогов III, II, I степени и болевым порогом, т. е.

$$P_7 = f(R),\ P_8 = f(R),\ P_9 = f(R) \text{ и } P_{10} = f(R),$$

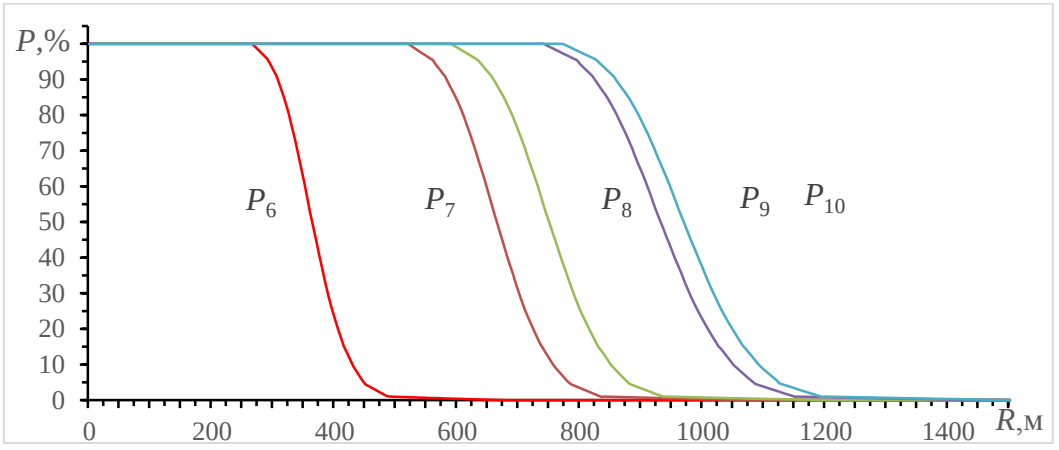
построенные для случаев инициации СПГ-воздушных горючих облаков вышеуказанных составов.



а)



б)



в)

Рис. 5. Расчетные зависимости вероятности P_6 летального поражения и вероятностей поражения ожогами: P_7 – III степени, P_8 – II степени, P_9 – I степени, и вероятности P_{10} болевого порога персонала от его удаленности от эпицентра взрыва СПГ-воздушного горючего облака при эксплуатации КЗ РН СПГ: а – для $m_г$ =13,32 кг; б – для $m_г$ =20 кг; в – для $m_г$ =30 кг

Характер данных зависимостей позволяет судить о том, что вероятности нанесения соответствующего поражения персоналу термическим воздействием в самом эпицентре взрыва имеют 100%-ное значение. По мере отдаления личного состава от эпицентра, на каком-то расстоянии вероятности воздействия начинают по очереди понижаться. Для наглядности опишем пороги начала снижения 100%-ной вероятности поражения персонала и вероятности, соответствующие 50% и 0% значению поражения. Такие результаты приведены в табл. 2. Что касается термического воздействия на РН, исходя из расчетов, можно сделать вывод, что большое значение имеет то, в какой период подготовки к пуску происходит взрыв горючего облака.

Таблица 2

Пороговые значения вероятностей поражения персонала взрывом СПГ-воздушного облака при эксплуатации КЗ РН СПГ

Вероятность	Удаленность от эпицентра взрыва R, м		
	$m_г$=13,32 кг	$m_г$=20 кг	$m_г$=30 кг
Летального поражения P_6^{100}	195	230	270
Летального поражения P_6^{50}	265	310	360
Летального поражения P_6^{0}	510	590	680
Получения ожогов III степени P_7^{100}	390	450	520
Получения ожогов III степени P_7^{50}	500	575	665
Получения ожогов III степени P_7^{0}	835	950	1080
Получения ожогов II степени P_8^{100}	445	510	590
Получения ожогов II степени P_8^{50}	565	650	750
Получения ожогов II степени P_8^{0}	935	1065	1200
Получения ожогов I степени P_9^{100}	560	645	745
Получения ожогов I степени P_9^{50}	710	815	930
Получения ожогов I степени P_9^{0}	1150	1295	1455
Болевого порога P_{10}^{100}	585	675	775
Болевого порога P_9^{50}	750	850	970
Болевого порога P_9^{0}	1195	1345	1520

Так, в случае, если инициация СПГ-воздушного облака происходит во время заправки баков, а следовательно, давление в них не превышает атмосферного, то увеличение массы паров компонента в их газовой полости не вызовет заброса давления, способного нанести ущерб корпусу ракеты-носителя. Значение избыточного давления, сформированного приходом массы испаряющегося компонента, будет иметь значение ниже значения давления срабатывания дренажно-предохранительного клапана (ДПК), которое для первых ступеней не превышает, как правило, 0,3 МПа. Об этом можно судить по графику, отражающему зависимость давления в баке РН от расстояния до эпицентра взрыва, представленную на рис. 6.

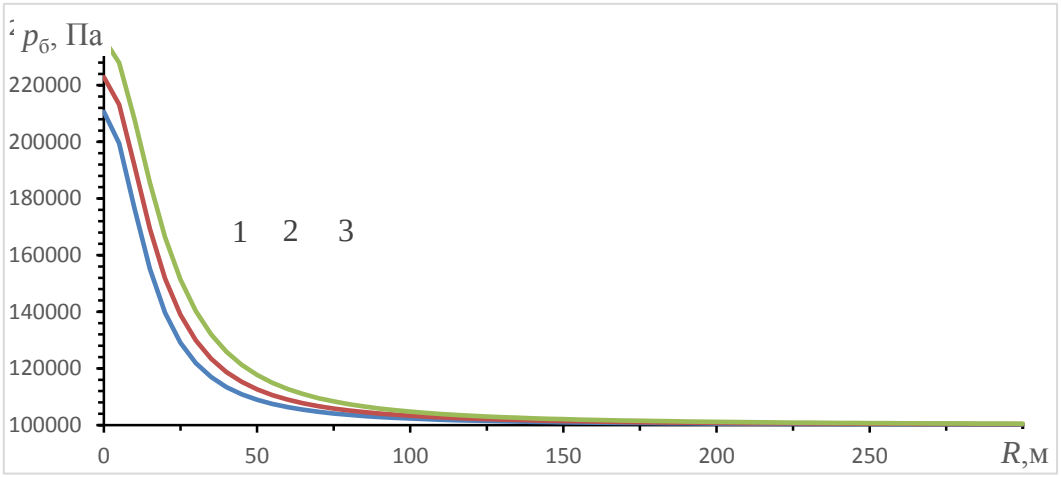


Рис. 6. Зависимость давления в газовой полости полностью заполненного жидким кислородом бака РН от расстояния до эпицентра взрыва R, до его предстартового наддува.
1 – для $m_г$=13,32 кг; 2 – для $m_г$=20 кг;
3 – для $m_г$=30 кг

Однако, если после заправки уже произведен предстартовый наддув баков РН, то воздействие теплового потока от взрыва горючего облака вызовет заброс давления в газовых полостях баков выше рабочего давления (давления срабатывания ДПК). Проходное сечение ДПК будет недостаточно для дренирования поступающих паров компонентов за время их формирования. Вследствие этого баки РН будут испытывать нагрузку, превосходящую расчетную, вплоть до момента полного сброса избыточного давления, а следовательно, возникнет вероятность разрушения обечайки баковых отсеков. Изменение давления в баке с жидким кислородом в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва представлено на рис. 7.

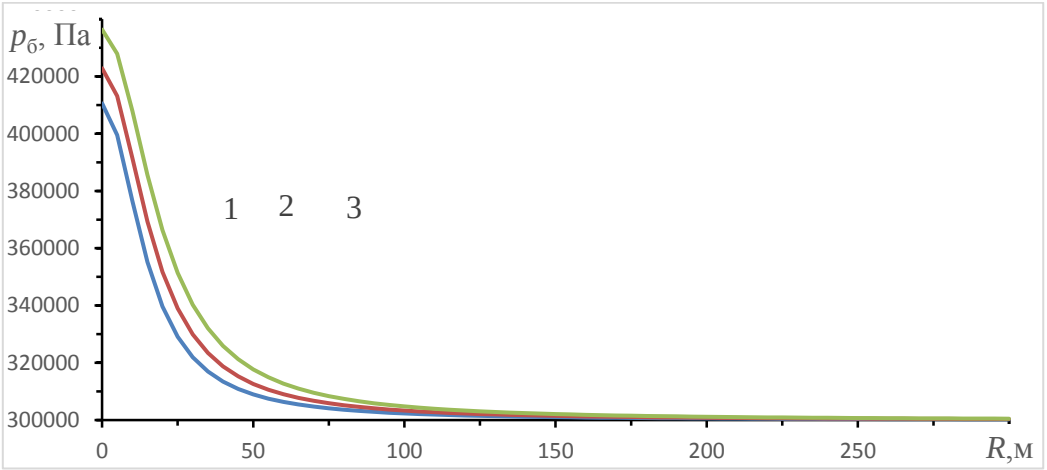


Рис. 7. Зависимость давления в газовой полости полностью заполненного жидким кислородом бака РН от расстояния до эпицентра взрыва R, после его предстартового наддува:
1 – для $m_г$ =13,32 кг; 2 – для $m_г$ =20 кг;
3 – для $m_г$ =30 кг

На рис. 8 представлена зависимость вероятности разрушения корпуса баков РН в случае проведения их предстартового наддува в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва.

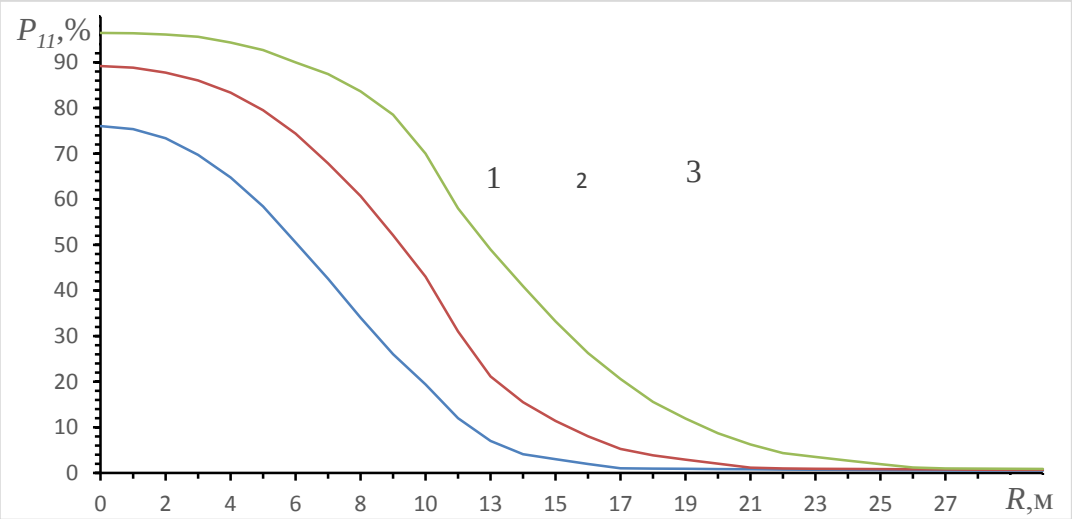


Рис. 8. Зависимость вероятности разрушения корпуса РН от расстояния до эпицентра взрыва R, после предстартового наддува баков: 1 – для $m_г$ =13,32 кг; 2 – для $m_г$ =20 кг; 3 – для $m_г$ =30 кг

Как видно, если эпицентр взрыва находится непосредственно рядом с РН, то вероятность разрушения обечайки его баковых отсеков весьма значительна и составляет 76, 89 и 95,5% при инициации 13, 32, 20 и 30 кг СПГ в составе горючего облака соответственно. Тем не менее эта вероятность стремительно снижается по мере отдаленности эпицентра взрыва от РН и уже к 30 м имеет значение менее 1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный выше математический аппарат позволяет рассчитать вероятность нанесения ущерба объектам безопасности, в частности обслуживающему персоналу и корпусу РН от взрыва СПГ-воздушного горючего облака на КЗ РН СПГ.

Анализ расчетных данных термобарического воздействия взрыва СПГ-воздушного облака позволяет сделать следующие выводы:

– КЗ РН СПГ является новым объектом, который из-за наличия в нем такого специфического компонента, как СПГ существенным образом отличается от ранее применяемых комплексов заправки РН;

– несмотря на то, что, на первый взгляд, КЗ РН СПГ является схожей технической системой с терминалом погрузки СПГ в газовозы, однако он имеет существенное отличие, выраженное в том, что заправка криогенных КРТ осуществляется в нетеплоизолированные баки РН, а следовательно, компоненты подвергаются полному тепловому воздействию со стороны окружающей среды и тех процессов, которые происходят в ней;

– барическое воздействие при дефлаграционном характере взрыва горючего облака практически не создает ущерба объектам безопасности, а наиболее значимым поражающим фактором является именно термическое воздействие, вследствие которого зона безопасного нахождения персонала должна составлять не менее 1000 м от эпицентра взрыва для рассмотренного выше случая, когда в реакцию вступило 13,32 кг СПГ;

– исходя из характера воздействия теплового облучения персонала, можно сделать вывод, что при увеличении массы вступившего в реакцию СПГ на каждые 10 кг безопасное расстояние для персонала должно быть увеличено примерно на 200 м по сравнению с указанным выше значением.

Список использованных источников

1. *Изотов Н. И.* Сжиженный природный газ. Технологии и оборудование. – М. : Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – 306 с.

2. *Бармин И. В., Кунис И. Д.* Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / под ред. А. М. Арзарова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 256 с.

3. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб. : Политехника, 2000. – 248 с.

4. *Краснов О. В.* Безопасность эксплуатации сложных технических систем. – ВИКУ им. А.Ф.Можайского, 2002. – 230 с.

5. *Вашпиев В. К.* Оценка воздействия опасных факторов взрыва и пожара на людей // Безопасность в техносфере : сб. ст. / Удмуртский университет. – Ижевск, 2011. – Вып. 7. – С. 72–79.

6. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. – М. : Наука, 1964. – 576 с.

7. *Лесконог А. А., Чуркин Г. Ю., Бекасов Ю. В.* Основные проблемы обеспечения промышленной безопасности криогенных трубопроводов сжиженного природного газа // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 12. – С. 41–45.

8. Моделирование аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса в условиях криолитозоны / Г. П. Стручкова [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 3. – С. 267–274.

9. *Архаров А. М., Кунис И. Д.* Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов / под ред. И. В. Бармина. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 252 с.

10. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах : сб. документов / Е. А. Иванов [и др.].– 3-е изд., испр. и доп. – М. : ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. – Сер. 27. Вып. 2. – 208 с.

11. *Зельдович Я. Б., Компанеец Л. С.* Теория детонации. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 268 с.

12. Основы практической теории горения : учеб. пособие / В. В. Померанцев [и др.]. – Л. : Энергия, 1973. – 264 с.

13. *Пономаренко В. К.* Ракетные топлива : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп.– СПб. : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 428 с.

14. ГОСТ 5542-2022. Газ природный промышленного и коммунально-бытового назначения // МЕГАНОРМ : [информац. система]. – URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения: 25.01.2026).

15. *Коровин Н. В.* Общая химия : учебник для техн. направ. и спец. вузов. – М. : Высш. шк., 2004. – 557 с.

16. Methods for the determination of possible damage // Green book / CPR 16E. – 1989.

17. *Pietersen C.M.* Consequences of accidental releases of hazardous material // J. Loss Prev. Process Ind. – 1990. – Vol. 3, January. – P. 27–36.

18. *Федоров А. В., Фомин П. А., Тропин Д. А.* Простая кинетика и структура детонационной волны в метановоздушной смеси // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 97–106.

19. *Сафонов В. С.* Влияние технико-технологических и природно-климатических факторов на специфику развития аварий на трубопроводах, транспортирующих широкую фракцию легких углеводородов // Вести газовой науки : научно-техн. сб. – 2020. – № 1(42). – С. 70–81.

20. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС РФ от 26 июня 2024 г. № 533 // Гарант : [информационно-правовая система]. – URL: https://www.garant.ru (дата обращения: 25.01.2026).

21. Прогнозирование санитарных потерь от воздействия теплового излучения в чрезвычайных ситуациях / Р. Ш. Еналеев [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 1. – С. 36–41.

22. *Храмов Г. Н.* Горение и взрыв. – СПб. : СПбГПУ, 2007. – 278 с.

23. *Шилов С. В.* Факторы поражения при разгерметизации газовых магистралей // Вестник Сыктывкарского университета. – 2014. – Сер.1, вып.1(19). – С.44–54.

24. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок : учебник для вузов / А. А. Козлов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1988. – 352 с.

25. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М. : Наука, 1972. – 721 с.

26. Основы строительной механики ракет / Л. И. Балабух [и др.]. – М. : Высш. шк., 1969. – 496 с.

М. О. Иванец,
кандидат технических наук;
А. М. Попов,
кандидат технических наук;
В. В. Ткаченко,
кандидат технических наук

ВЕРИФИКАЦИЯ КОНВЕЙЕРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ НА ОСНОВЕ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

В работе рассматривается задача формальной верификации конвейеров постобработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе цветных сетей Петри (CPN). Несмотря на кажущуюся тривиальность требований к спектральному составу данных, условия гетерогенности источников, масштабируемости обработки и высокой ответственности за результаты обработки данных являются критически важными для обеспечения надежности и доверия к системе. Предложена строгая CPN-модель конвейера, в которой маркеры отражают структуру реальных данных ДЗЗ, а гварды переходов кодируют условия корректности обработки. Для ациклических сетей с локальными гвардами доказана разрешимость задачи достижимости без симуляции: условие появления результата в выходной позиции сводится к статической проверке наличия требуемых спектральных каналов в начальной маркировке. Показано, что формальный подход позволяет исключить ошибки на этапе проектирования, обеспечивая доказуемую гарантию корректности вычислений. Результаты подчеркивают значимость применения формальных методов в геоинформационных системах как средства повышения воспроизводимости, прозрачности и сертифицируемости конвейеров обработки данных ДЗЗ.

Ключевые слова: цветные сети Петри, дистанционное зондирование Земли, формальная верификация, постобработка спутниковых данных, спектральные каналы, конвейер обработки данных.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) сталкивается с проблемой возрастающих объемов генерируемых данных, обладающих сложной структурой порядковой размерности. Эта структура включает пространственные координаты (x, y), спектральные измерения (многоканальные и гиперспектральные данные), временные ряды наблюдений, а также дополнительную семантическую информацию (метаданные, маски качества, цифровые модели рельефа). Подобная организация данных естественным образом описывается в рамках тензорных представлений высокого ранга, что требует создания методов обработки, при использовании которых учитываются как вычислительные затраты, так и логическая сложность технологических цепочек постобработки.

В настоящее время преобладающие решения – императивные скрипты (на Python, R), специализированные платформы (такие как SNAP, Google Earth Engine) или системы управления workflows – имеют существенный недостаток – отсутствие формальной семантики и строгих гарантий корректности выполняемых операций.

Ошибки, возникающие на этапах трансформации данных (например: некорректное вычисление спектральных индексов, нарушение физически обусловленных границ значений, несоответствие типов или размерностей тензоров), часто обнаруживаются только эмпирическим путем. Такая ситуация является недопустимой для программ, предъявляющих высокие требования к надежности, – программ, связанных с мониторингом климатических изменений, управлением сельскохозяйственными ресурсами, оценкой последствий чрезвычайных ситуаций и решением задач обеспечения национальной безопасности.

Предлагается принципиально новый подход, основанный на интеграции формальных методов моделирования и современных технологий тензорных вычислений. В качестве теоретической основы используется расширенная модель цветных сетей Петри (CPN), в которой маркеры трактуются не как простые фишки, а как структурированные объекты, содержащие многомерные тензоры данных ДЗЗ и связанные с ними метаданные. Переходам сети соответствуют операции обработки (атмосферная коррекция, фильтрация, классификация, расчет индексов), а их активация контролируется с помощью охраняющих условий – предикатов, формулирующих предварительные требования к корректности (например: наличие определенных спектральных каналов, допустимые диапазоны значений).

Главное достоинство данного подхода заключается в возможности проведения формального анализа свойств построенной модели: применяя методы символьного исследования пространства состояний, абстрактной интерпретации или SMT-верификации, можно строго доказать такие характеристики, как безопасность (сохранение инвариантов, например, *NDVI* в пределах [−1,1]), живость (гарантированное завершение обработки при наличии входных данных) и отсутствие тупиковых ситуаций (согласованность всех этапов конвейера).

Дальнейшее развитие рассматриваемого направления связано с проектированием гибридных нейро-символьных архитектур, в которых формальная модель CPN управляет логикой выполнения процессов, а ресурсоемкие тензорные операции (включая дифференцируемые преобразования, реализованные в средах PyTorch/TensorFlow) выполняют требующие значительных вычислений задачи, такие как семантическая сегментация или регрессионный анализ. Подобный синтез позволяет объединить строгость и верифицируемость формальных методов с высокой выразительной способностью современных алгоритмов машинного обучения. В долгосрочной перспективе развитие теории и инструментария тензорных CPN может стать основой для создания нового поколения сертифицируемых, прозрачных и надежных систем анализа космических данных, соответствующих стандартам критически важных приложений.

КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Современные методы дистанционного зондирования Земли из космоса в значительной степени опираются на анализ производных показателей, рассчитываемых на основе первичных спектральных измерений. Наиболее распространенными среди них являются спектральные индексы (СИ) – безразмерные величины, вычисляемые как комбинации отражений в различных участках электромагнитного спектра. Они предназначены для усиления сигнала от искомого объекта или явления и для минимизации влияния мешающих факторов, таких как атмосферная дымка, фон подстилающей поверхности или вариации освещенности.

В контексте оперативного мониторинга ключевое значение имеет не только алгоритм расчета индекса, но и доступность исходных данных, обеспечивающих необходимую пространственную, временную и спектральную детальность. В данном аспекте особый интерес представляет группа космических аппаратов *Sentinel-2* [1]. Выбор данных, формируемых приведенной группой космических аппаратов обусловлен следующими преимуществами:

1. Уникальная спектральная разрешающая способность. В отличие от других открытых орбитальных группировок космических аппаратов, *Sentinel-2* несет мультиспектральный сканер (MSI) с 13 каналами, включая три узких канала в критически важной области «красного края» (Red Edge, каналы B5, B6, B7) и два канала в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR, B11, B12). Наличие этих каналов позволяет выходить за рамки классических индексов типа нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI

(Normalized Difference Vegetation Index) и разрабатывать высокоспециализированные показатели, чувствительные к биофизическим и биохимическим параметрам растительности.

2. Оптимальное пространственное разрешение. Данные предоставляются с разрешением 10 м (видимый и ближний ИК), 20 м (красный край и SWIR) и 60 м (атмосферные каналы), что подходит для решения задач как регионального, так и детального локального уровня.

3. Открытая политика распространения данных. Это делает их широкодоступными для научного сообщества [1].

Многообразие СИ может быть структурировано в несколько ключевых групп в зависимости от решаемых ими задач.

Первая группа – индексы для оценивания состояния и продуктивности растительности:

– классический нормализованный относительный индекс растительности NDVI $\in [-1,1]$, (*B8-B4*)/(*B8+B4*). Он служит для общей оценки «зелености» и фотосинтетической активности;

– индексы, скорректированные на влияние почвы и атмосферы. EVI (*Enhanced Vegetation Index*) и EVI2 – включают поправочные коэффициенты для снижения воздействия фона почвы и атмосферного аэрозоля. MSAVI2 (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) также минимизирует почвенный фон, что особенно важно на ранних стадиях развития растительности;

– индексы, использующие каналы красного края. Эта область спектра высокочувствительна к изменению содержания хлорофилла. NDRE [*Normalized Difference Red Edge Index*, (*B8A-B5*)/(*B8A+B5*)] менее подвержен насыщению в условиях высокой биомассы по сравнению с NDVI и эффективен для оценивания азотного статуса сельскохозяйственных культур. S2REP (*Sentinel-2 Red-Edge Position Index*) – сложный индекс, определяющий положение точки перегиба на границе красного и ближнего ИК-диапазонов [2];

– индексы для оценивания пигментного состава. GNDVI (Green NDVI), использующий зеленый канал (B3), демонстрирует повышенную чувствительность к содержанию хлорофилла. PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*) и ARI (*Anthocyanin Reflectance Index*) предназначены для оценивания не зеленых пигментов (каротиноидов и антоцианов), что является маркером старения или физиологического стресса растений.

Вторая группа – индексы для мониторинга водных объектов и влажности. Водная поверхность и влажность растительности сильно поглощают излучение в ИК-диапазонах, что лежит в основе следующих индексов:

– индексы водных объектов. Базовым является NDWI [*Normalized Difference Water Index*, (*B3-B8*)/(*B3+B8*)], который выделяет открытые водные поверхности. Его модификация MNDWI (*Modified NDWI*), в которой вместо ближнего ИК-канала (B8) используется SWIR-канал (B11), значительно эффективнее подавляет сигнал от застроенных территорий и влажных почв, обеспечивая более точное картирование береговых линий;

– индекс влажности NDMI [*Normalized Difference Moisture Index*, (*B8-B11*)/(*B8+B11*)]. Он оценивает содержание воды в растительном покрове (влажность полога) и широко применяется для мониторинга засух и оценивания пожарной опасности.

Третья группа – индексы для картографирования урбанизированных территорий и почв. Сегментация искусственных поверхностей и открытого грунта требует иного спектрального подхода:

– NDBI [*Normalized Difference Built-up Index*, (*B11-B8*)/(*B11+B8*)]. Он использует тот факт, что застройка и искусственные материалы имеют высокое отражение в SWIR-диапазоне (B11) и низкое – в ближнем ИК (B8), что противоположно спектральному отклику растительности;

– BSI (*Bare Soil Index*). Он является комплексным показателем, предназначенным для максимизации сигнала от обнаженной почвы и его отделения от растительности и урбанизированных зон [2].

Представленная классификация наглядно демонстрирует, что данные ДЗЗ служат основой для расчета широкой номенклатуры спектральных индексов, а спектральные индексы, вычисляемые на основе данных мультиспектральной космической съемки космических аппаратов Sentinel-2, являются стандартом для многопараметрического анализа состояния земной поверхности в современных научных исследованиях и прикладных областях.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОВЕРКИ КОРРЕКТНОСТИ ВЫБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ НОРМАЛИЗОВАННОГО РАЗНОСТНОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА

Необходимо проверить корректность вычисления нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) на основе данных мультиспектральной космической съемки космических аппаратов Sentinel-2. Требуется гарантировать, что:

1. NDVI вычисляется только при наличии каналов красного (*B4*) и ближнего ИК (*B8*);
2. Результат всегда лежит в диапазоне [–1,1].

Пусть задана цветная сеть Петри (9-компонентный кортеж):

$$CPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I), \quad (1)$$

В формуле (1) использованы следующие обозначения:

P – конечное множество позиций;

T – конечное множество переходов;

$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – множество дуг;

Σ – множество цветовых множеств (*colset*) – типы данных маркеров [например: *INT, Product(string*int), List INT*];

V – множество переменных, каждая с типом из Σ;

$C : P \to \Sigma$ – функция, задающая цветовое множество для каждой позиции;

$G : T \to Exprbool(V)$ – гварды (предикаты) для переходов (выражения, возвращающие *bool*);

$E : A \to Expr(V)$ – выражения на дугах (определяют, какие маркеры снимаются (или добавляются);

$I : P \to MultiSet(C(p))$ – начальная маркировка (мультимножество маркеров типа $C(p)$).

Цветная сеть Петри [3], моделирующая конвейер вычислений NDVI, должна удовлетворять ряду условий, к которым относятся следующие:

1. Структурная ацикличность: граф сети не содержит направленных циклов.
2. Локальность переходов: каждый переход $t \in T$ имеет ровно одну входную позицию $p_{in} \in P$ и одну или несколько выходных позиций, причем гвард $G(t)$ и выражения на дугах $E(a)$ зависят только от переменных, связанных с маркерами из p_{in};
3. Детерминированное ветвление: для любого маркера $m \in MultiSet(C(p_{in}))$ существует не более одного перехода $t \in T$, для которого гвард $G(t)$ истинен при подстановке m;
4. Конечность данных: начальная маркировка I содержит конечное число маркеров, каждый из которых принадлежит конечному множеству типов, определяемых цветовыми множествами Σ.

Каждый маркер в позиции p_{in} имеет структуру

$$m = (s, L), \tag{2}$$

где S – идентификатор сцены, принадлежащий соответствующему цветовому множеству;

L – список каналов, принадлежащий соответствующему цветовому множеству.

Требуется установить истинность следующего выражения:

$$\forall M \in Reach(CPN, I), \forall s : (\exists y.\ (s, y) \in M(p_{out})) \Rightarrow (\exists L.\ (s, L) \in I(p_{in}) \wedge (B4 \in L) \wedge (B8 \in L)).$$

Символ *y* во втором маркере указывает на компонент, хранящий путь к файлу снимка, который для задачи проверки каналов несуществен.

МОДЕЛЬ ВЫБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ НОРМАЛИЗОВАННОГО РАЗНОСТНОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА

В качестве среды моделирования выступает CPN IDE, поскольку в ней в полной мере реализованы все необходимые инструменты для работы с цветными сетями Петри [4], а также с их расширениями (рис. 1).

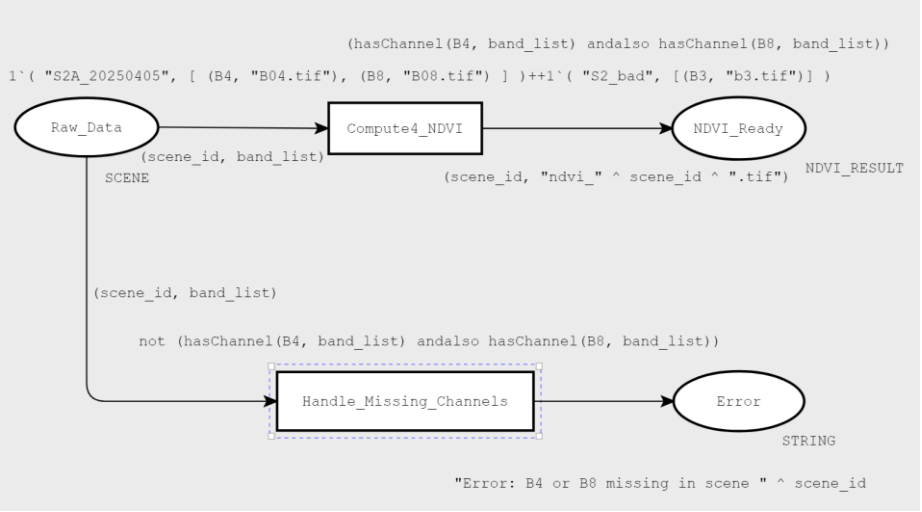


Рис. 1. Модель выбора данных для расчета NDVI

Модель состоит из трех позиций (Raw_Data, NDVI_Ready, Error) и двух переходов (Compute4_NDVI, Handle_Missing_Channels). Для каждой позиции определен соответствующий ей цветовой тип канала:

- Raw_Data → SCENE (colset SCENE = product IMAGE_ID*BAND_LIST;
  closet IMAGE_ID = string;
  colset BAND_LIST = list BAND;
  colset BAND = product CHANEL*IMAGE_ID;
  colset CHANEL = with B2 | B3 | B4 | B8;);
- NDVI_Ready → NDVI_RESULT (colset NDVI_RESULT = product IMAGE_ID*IMAGE_ID;
  closet IMAGE_ID = string;);
- Error → STRING (colset STRING = string;).

Определены выражения для дуг сети:

- (scene_id, band_list) → var scene_id: IMAGE_ID;

var band_list: BAND_LIST;

- (scene_id, "ndvi_" ^ scene_id ^ ".tif") → маркер выводит результат вычисления NDVI;
- "Error: B4 or B8 missing in scene" ^ scene_id → маркер типа STRING, вывод сообщения об ошибке.

Кроме того, определены две функции для гвардов выполнения переходов:

– (hasChannel(B4, band_list) andalso hasChannel(B8, band_list)) → гвард выбора требуемых номеров спектральных каналов. Гвард вызывает функцию ML (Meta Language) из панели Standard Declarations (рис. 2);

– второй гвард выполняет логическую операцию отрицания вызванной ML-функции → not (hasChannel(B4, band_list) andalso hasChannel(B8, band_list)).

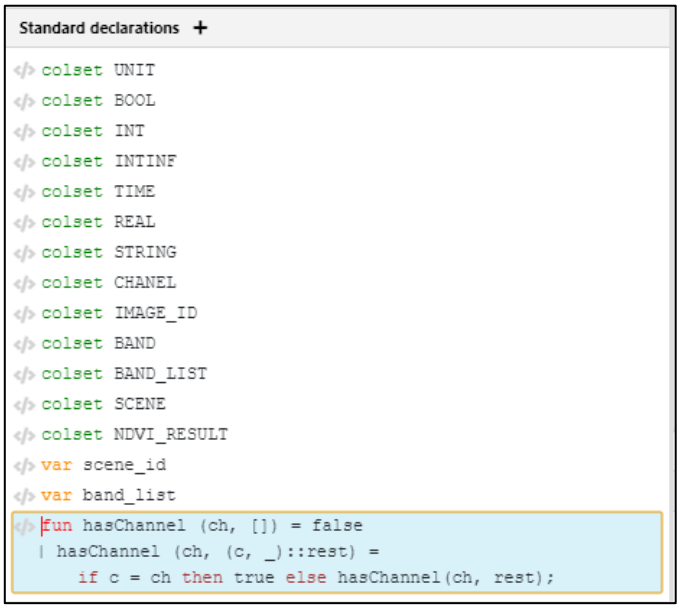
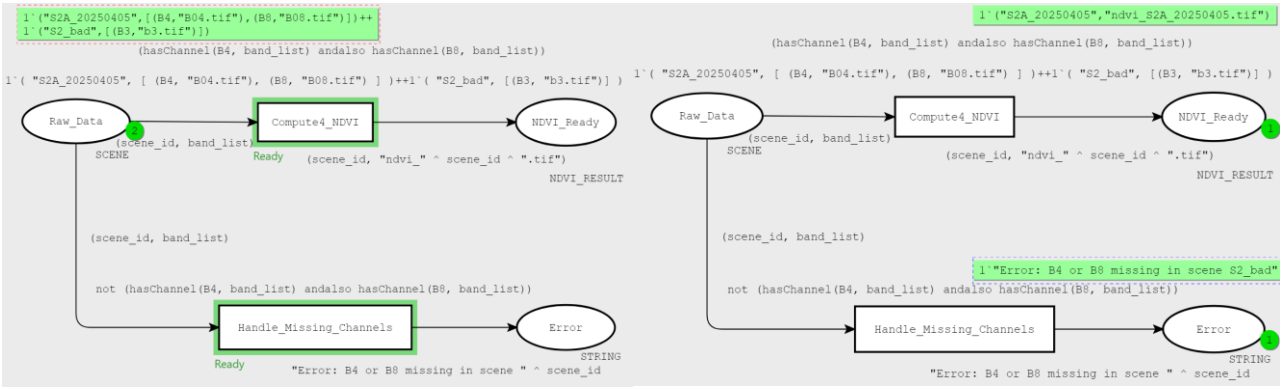


Рис. 2. Объявление ML-функции в Standard Declarations

В позиции Raw_Data находятся маркеры, хранящие в себе идентификационный номер снимка и список спектральных каналов (например, как указано на рис. 2 →1`("S2A_20250405", [(B4, "B04.tif"), (B8, "B08.tif")])++1`("S2_bad", [(B3, "b3.tif")])) (рис. 3).



а) б)

Рис. 3. Моделирование процесса выбора требуемых спектральных каналов для вычисления NDVI:
а – старт моделирования;
б – результат моделирования

Модель в результате имитации осуществила корректный выбор данных (маркеров) для вычисления NDVI, в которых были спектральные каналы B4 и B8, а также осуществила отбраковку тех данных, в которых для вычисления NDVI не было необходимых спектральных каналов.

СИМВОЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ МОДЕЛИ

В тех случаях, когда провести имитационное моделирование процесса невозможно, решить задачу проверки корректности данных возможно путем сведения задачи к символьно-логическому анализу.

Предположим, что маркер $(s,\cdot)$ достижим в p_{NDVI}. Поскольку сеть ациклическая (условие 1), любой путь от начальной маркировки до p_{NDVI} конечен и не содержит повторяющихся позиций. Согласно локальности переходов (условие 2), единственный способ появления маркера в p_{NDVI} – срабатывание перехода t_{NDVI}, который забирает маркер из позиции $p_{RawData}$. Следовательно, в некотором промежуточном состоянии должен существовать маркер $(s,L) \in p_{RawData}$. Но поскольку сеть ациклическая и не порождает новых сцен, этот маркер должен присутствовать в начальной маркировке I. Более того, для срабатывания t_{NDVI} его гвард должен быть истинным, т. е. $B4, B8 \in L$.

Пусть в начальной маркировке I содержится маркер $(s,L) \in p_{RawData}$, такой, что $B4, B8 \in L$. Тогда гвард перехода t_{NDVI} истинен при подстановке этого маркера. По условию детерминированного ветвления (условие 3) ни один другой переход не может использовать этот маркер, так как гварды всех альтернативных переходов (например, t_{error}) ложны. Следовательно, переход t_{NDVI} разрешен и, согласно семантике сетей Петри, может сработать. При его срабатывании маркер (s,L) удаляется из $p_{RawData}$, а в p_{NDVI} добавляется маркер вида $(s,\cdot)$. Таким образом, данный маркер достижим. Этот результат показывает, что для практически значимых структурированных CPN-моделей обработки данных ДЗЗ формальная верификация может быть сведена к эффективному символьно-логическому анализу, что делает этот подход более широко применимым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На первый взгляд требование наличия каналов B4 (красный) и B8 (ближний инфракрасный) для корректного вычисления нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) может показаться тривиальным и не нуждающимся в формальном обосновании. Однако именно такие, казалось бы, очевидные условия становятся источником скрытых ошибок в реальных системах обработки данных ДЗЗ, где данные поступают из разнородных источников с разным уровнем предварительной обработки, конвейеры включают десятки взаимосвязанных этапов, а объемы обрабатываемой информации достигают масштабов, исключающих ручной контроль. В условиях, когда результаты анализа используются для принятия решений в критически важных областях, интуитивного понимания условий корректности оказывается недостаточно. Требуется строгая, поддающаяся машинной проверке спецификация, которая гарантирует, что логика обработки сохранится даже при изменении состава входных данных, что ошибки будут выявляться на этапе проектирования, а не в процессе эксплуатации и что система останется надежной при интеграции новых датчиков или алго-

ритмов. Предложенный в работе подход – моделирование конвейера постобработки данных ДЗЗ в виде цветной сети Петри – позволяет перевести эмпирические правила в формальную математическую модель [5], пригодную для автоматической верификации.

Было строго доказано, что для ациклических сетей с локальными гвардами задача проверки корректности спектрального состава разрешима статически: условие достижимости результата сводится к логическому предикату над начальной маркировкой, а сама модель обеспечивает доказуемую гарантию отсутствия вычислений NDVI на неполных или некорректных данных.

Таким образом, исследование не ставит своей целью переосмысление физических основ вегетационных индексов, а решает инженерную проблему обеспечения надежности и доверия к сложным автоматизированным конвейерам. В настоящее время, когда данные ДЗЗ становятся основой для цифровых двойников, систем точного землепользования и глобального экологического мониторинга, формальные методы превращаются в необходимый инструмент для обеспечения воспроизводимости, объяснимости и верифицируемости результатов. Полученные результаты открывают путь к созданию сертифицируемых, прозрачных и отказоустойчивых систем анализа космических данных, что соответствует современным требованиям к надежности прикладных геоинформационных технологий.

Список использованных источников

1. Comparison of spectral indices extracted from Sentinel-2 images to map plastic covered greenhouses through an object-based approach / M.A. Aguilar et al.] // GIScience & Remote Sensing. – 2022. – № 59(1). – P. 822–842. – URL: https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2071057 (дата обращения: 28.11.2025).

2. *Montero D., Aybar C., Mahecha M.D.* A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research // Sci Data. – 2023. – № 10(197). – URL: https://doi.org/10.1038/s41597-023-02096-0 (дата обращения: 28.11.2025).

3. *Kurt Jensen, Lars M. Kristensen* Colored Petri nets: a graphical language for formal modeling and validation of concurrent systems // Communications of the ACM. – 2015. – № 58. – С. 61–70. – URL: https://doi.org/10.1145/2663340 (дата обращения: дата обращения: 28.11.2025).

4. *Шмелев В. В., Попов А. М.* Алгоритм первичной обработки телеметрической информации с автоматизированной верификацией исходных данных и коррекцией ошибок // Информация и Космос. – 2023. – № 3. – С. 53–58. – URL: infokosmo.ru/ru/article/17167 (дата обращения: дата обращения: 28.11.2025).

5. *Павлов Д. А., Ткаченко В. В., Попов А. М.* Модель коррекции начальной маркировки классической сети Петри на основе решения задачи дискретного программирования // Труды МАИ. – 2023. – № 131. – URL: https://trudymai/ru/published.php?ID=175928&ysclid=mpchlmnb8426348960. – DOI: 10.34759/trd-2023-131-22.

А. А. Кобзарь;
И. О. Кукушкин,
кандидат технических наук, доцент;
А. И. Петухов,
кандидат технических наук;
Д. Г. Просянников

МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ФАКЕЛА ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОННОГО ИСТОЧНИКА

В работе исследуется влияние земной атмосферы на точность дистанционного спектрального анализа факелов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Показано, что при дистанционном диагностировании факела двигательной установки ЖРД селективное поглощение и рассеяние излучения на атмосферной трассе приводят к значительным искажениям регистрируемых спектров, затрудняя определение истинных температур, концентраций компонентов и скорости горения. Представлена математическая модель переноса излучения через атмосферу, учитывающая основные факторы искажений: поглощение молекулами (H_2O, CO_2, O_3, O_2), рэлеевское и аэрозольное рассеяние. Рассмотрены и проанализированы методы нивелирования атмосферных эффектов: синхронное измерение спектров эталонных источников, использование моделей атмосферы (*MODTRAN, HITRAN*) и алгоритмов численной коррекции. Проведено модельное исследование, демонстрирующее величину искажений для типичных условий и эффективность методов коррекции.

Ключевые слова: спектроскопия факелов, атмосферные искажения, перенос излучения, поглощение, рассеяние, коррекция спектров, жидкостные ракетные двигатели, дистанционная диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционная оптическая диагностика факелов двигательных установок (ДУ) ракетно-космической техники (РКТ) является мощным инструментом для контроля параметров рабочего процесса, оценки эффективности сгорания и выявления аномалий. Спектральный анализ излучения факела позволяет получать концентрации основных компонентов (H_2O, CO_2, CO, H_2, OH, металлов), размеры частиц сажи и оксидов алюминия (для твердотопливных ДУ), а также скорость потока на основе доплеровского уширения линий. Однако излучение факела, распространяясь от источника до измерительного прибора, неизбежно проходит через слой атмосферы Земли. Атмосфера не является прозрачным окном, особенно в инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах. Она избирательно поглощает и рассеивает излучение, что приводит к существенным искажениям регистрируемого спектра по сравнению со спектром, излучаемым непосредственно факелом. Эти искажения вносят систематическую ошибку в определение физико-химических параметров факела, снижая точность и достоверность диагностики.

Целью представленной работы является разработка метода дистанционного диагностирования спектра излучения факела двигательной установки с использованием эталонного источника.

Таким образом, без процедуры коррекции атмосферного влияния невозможна достоверная диагностика технического состояния двигательных установок ракет-носителей. Система контроля, не учитывающая погодные условия (влажность, давление, запыленность трассы визирования), может либо пропустить начинающуюся аварию, либо, наоборот, выдать ложную команду об аварийном выключении двигателя на штатно работающей двигательной установке, что актуально для пилотируемых ракет-носителей, снабженных системой аварийного спасения (САС).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пусть $I_0(\lambda)$ – истинная спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) факела ДУ на длине волны λ при выходе из зоны горения (в направлении на детектор). Излучение проходит через атмосферный слой толщиной L (по линии визирования). Задача состоит в том, чтобы по измеренной СПЭЯ на детекторе $I(\lambda)$ максимально точно восстановить $I_0(\lambda)$.

Перечислим основные факторы атмосферного влияния [1]:

1. Селективное поглощение: молекулы H_2O, CO_2, O_3, O_2, CH_4, N_2O имеют характерные полосы поглощения в видимом, ИК- и УФ-диапазонах.

2. Рэлеевское рассеяние: рассеяние на молекулах воздуха ($\sim \lambda^{-4}$), значимое в ультрафиолетовой и видимой областях спектра.

3. Аэрозольное рассеяние и поглощение: рассеяние и поглощение на частицах пыли, дыма, каплях воды, зависящее от размера частиц, их концентрации и состава.

4. Фоновая засветка: рассеянное солнечное излучение или излучение от других источников, попадающее в поле зрения прибора.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Уравнение переноса излучения (в приближении однократного рассеяния и без учета фона) в форме упрощенного уравнения для наблюдаемой спектральной яркости в направлении детектора выглядит следующим образом [2]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \times \tau(\lambda, L), \quad (1)$$

где $\tau(\lambda, L)$ – коэффициент пропускания атмосферы на длине волны λ для пути L.

Коэффициент пропускания атмосферы вычисляется как произведение вкладов различных процессов:

$$\tau(\lambda, L) = \tau_{погл}(\lambda, L) \times \tau_{рэл}(\lambda, L) \times \tau_{аэр}(\lambda, L), \quad (2)$$

где поглощение $\tau_{погл}$ рассчитывается по закону Бугера – Ламберта – Бера для N поглощающих газов [2], тогда

$$\tau_{погл}(\lambda, L) = \exp(\sigma \times (l)\, dl), \quad (3)$$

где σ – сечение поглощения i-го газа на длине волны λ;

(l) – концентрация i-го газа на расстоянии l от источника.

Рэлеевское рассеяние $\tau_{рэл}$ вычисляется с помощью коэффициента ослабления [2]:

$$\beta_{рэл}(\lambda) = (8\pi^3 \times (n^2 - 1)^2) / (3 \times \times \lambda^4), \ \tau_{рэл}(\lambda, L) = \exp(-\beta_{рэл}(\lambda) \times L), \quad (4)$$

где n – показатель преломления воздуха;

N_s – число молекул в единице объема.

Аэрозольное ослабление $\tau_{аэр}$ моделируется с использованием эмпирических моделей (например, модели стандартной атмосферы) или измеренных параметров аэрозоля [коэффициента ослабления $\beta_{аэр}(\lambda)$]:

$$\tau_{аэр}(\lambda, L) = \exp(-\beta_{аэр}(\lambda) \times L). \quad (5)$$

Модель спектральной линии (для расчета) строится следующим образом: сечение поглощения в линии задается контуром (профилем), для учета доплеровского и столкновительного уширения используется профиль Фойгта [3]:

$$V(\lambda, \lambda_0) = \int G(\lambda', \lambda_0, \Delta\lambda_D) \times L(\lambda - \lambda', \lambda_0, \Delta\lambda_L)\, d\lambda', \quad (6)$$

где $G(\lambda', \lambda_0, \Delta\lambda_D)$ – гауссов (доплеровский) профиль с центром λ_0 и полушириной $\Delta\lambda_D$;
$L(\lambda - \lambda', \lambda_0, \Delta\lambda_L)$ – лоренцев (столкновительный) профиль с центром λ_0 и полушириной $\Delta\lambda_L$, при этом $\Delta\lambda_L = S \times V(\lambda, \lambda_0)$ – для одиночной линии, где S – интенсивность линии.

Данные о положении линий (λ_0), их интенсивности (S), полуширинах $\Delta\lambda_D$, $\Delta\lambda_L$ берутся из спектроскопических баз данных (HITRAN, GEISA).

Приведем *исходные данные для модельного расчета*.

Спектр факела $I_0(\lambda)$ выражается через модельный спектр излучения факела ЖРД (например, на топливе кислород-керосин) в диапазоне 2–5 мкм [3]. Содержит характерные полосы излучения CO_2 (~4,3 мкм), CO (~4,7 мкм), H_2O (~2,7 мкм; 6,3 мкм), а также континуум от сажи/частиц.

Условия: 1) длина трассы L = 5 км (типично для стартовых позиций); 2) модель атмосферы: умеренные широты, лето (стандартная или заданная), день; 3) профили концентраций газов: H_2O (относительная влажность 70% у земли, экспоненциальное убывание с высотой), CO_2 (400 ppm), O_3 (стандартный профиль); 4) видимость – 20 км (для расчета аэрозольного ослабления по модели, например по модели Косхмидера); 5) температура атмосферы T_a – 288 K (15°C) у земли; 6) параметры линий – данные из базы HITRAN2020 [4] для H_2O, CO_2, CO, O_3 в выбранном диапазоне; 7) используется узкополосная модель или модель с применением предварительно рассчитанных спектров пропускания (например, из MODTRAN) [5].

МЕТОДЫ НИВЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ АТМОСФЕРЫ НА СПЕКТРО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАКЕЛА

1. *Использование эталонного источника.*

1.1. Одновременно с измерением факела измеряется спектр $I_{эт}(\lambda)$ эталонного источника, расположенного рядом с факелом или за ним (по возможности) и видимого через тот же атмосферный слой [6].

1.2. Коррекция спектра факела: предполагая, что $\tau(\lambda, L)$ и $B(\lambda, T_a)$ одинаковы для трасс к факелу и эталону (что верно при близком расположении и одинаковом времени измерения), можно выразить $\tau(\lambda, L)$ из уравнения для эталона и подставить в уравнение (1) для факела, чтобы найти $I_0(\lambda)$ (метод требует тщательного выбора и калибровки эталона) [7].

2. *Использование моделей атмосферы.* Используются сложные атмосферные коды (MODTRAN, FASCODE, LBLRTM, HITRAN *Application*) [8], которые по заданным метеоусловиям (профили T, P, влажности, концентраций газов, параметров аэрозоля, времени суток и положения Солнца) рассчитывают спектральное пропускание $\tau_{мод}(\lambda, L)$ и собственное излучение атмосферы $B_{мод}(\lambda, T_a)$.

3. *Алгоритмы численной коррекции.*

3.1. Линейный метод: если искажения в узком спектральном интервале относительно малы, можно использовать линейную аппроксимацию: $I(\lambda) \approx k(\lambda) * I_0(\lambda) + b(\lambda)$, где $k(\lambda)$ и $b(\lambda)$ определяются по калибровкам или моделям [9].

3.2. Метод обратной свертки (деконволюции): пытаются найти $I_0(\lambda)$, решив интегральное уравнение $I(\lambda) = \int R(\lambda, \lambda') \cdot I_0(\lambda')\, d\lambda'$, где $R(\lambda, \lambda')$ – аппаратная функция атмосферы (функция рассеяния точки). Метод сложен и неустойчив к шумам [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выявлено, что наиболее эффективным подходом является комбинация методов 1 и 2 (коррекция по эталону с использованием модели атмосферы для уточнения или интерполяции). Результаты исследования представлены на графике зависимости нормированной интенсивности излучения факела от длины волны (рис. 1).

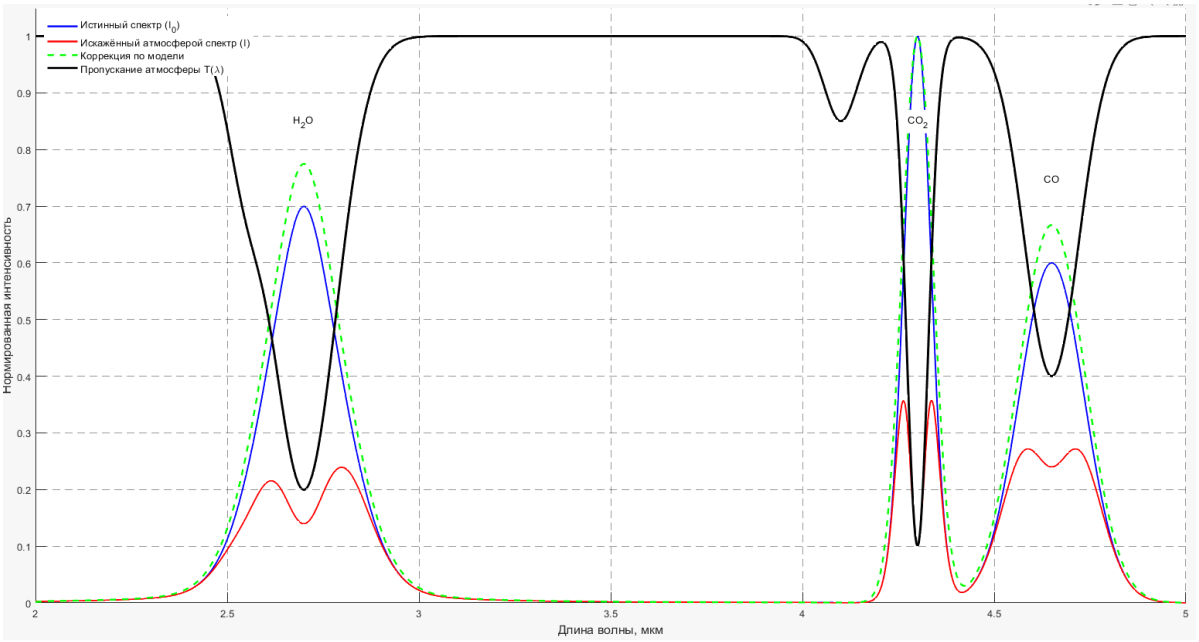


Рис. 1. График зависимости нормированной интенсивности излучения факела от длины волны

При старте РН на корпусе устанавливается эталонный источник излучения. Два спектрометра, работающие в диапазоне длин волн от 2 до 5 мкм на длине трассы L, производят прямое измерение спектра факела ДУ ЖРД и эталонного источника. В результате сопоставления двух спектров фиксируется атмосферное влияние на опорный источник, после чего производится коррекция измеренного спектра факела ДУ ЖРД. Таким образом, получается истинный спектр факела, по которому проводится дистанционное техническое диагностирование на предмет отклонения работы ЖРД от штатного режима.

Приведем описание метода дистанционного диагностирования спектра излучения факела двигательной установки с использованием эталонного источника: 1) генерация спектра факела: моделируются характерные полосы излучения CO_2 (4,3 мкм), CO (4,7 мкм) и H_2O (2,7 мкм), учитывается температурная зависимость; 2) строятся модели атмосферных эффектов: поглощение водяным паром (три основные полосы), поглощение CO_2 (сильная полоса 4,3 мкм), аэрозольное ослабление (зависит от видимости), рэлеевское рассеяние (слабое в ИК-диапазоне), собственное излучение атмосферы; 3) применяются методы коррекции: по эталонному источнику, по модели атмосферы (используется «идеальная» модель пропускания); 4) проводится сравнительный анализ путем сравнения исходного, искаженного и скорректированных спектров, построение графика атмосферного пропускания, оценивание относительного отклонения, расчёт отклонения для разных методов.

Основной график показывает исходный спектр факела (синий); спектр, искаженный атмосферой (красный); спектр после коррекции (зеленый). График зависимости нормированной интенсивности излучения факела от длины волны демонстрирует области сильного поглощения в полосах CO_2 и H_2O и свидетельствует о максимальных отклонениях в областях

сильного поглощения, об эффективности коррекции (снижение отклонений в 2–5 раз) и преимуществе модели атмосферы в областях с низким отношением сигнал/шум.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе единой математической формализации задачи восстановления спектра факела с учетом всех факторов атмосферного влияния (поглощение, рассеяние, собственное излучение атмосферы) обоснован комбинированный подход (эталон + модель атмосферы) как наиболее эффективный для условий наземных испытаний с указанием конкретных требований к точности метеоданных (особенно профиля влажности и аэрозолей).

Разработанный комбинированный метод спектральной коррекции позволяет перейти от лабораторных измерений к достоверной дистанционной диагностике ЖРД и ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) в реальных условиях испытаний:

– определение температуры ядра факела по отношению интенсивностей полос CO_2 (4,3 мкм) и CO (4,7 мкм) с точностью ±50 К;

– количественная оценка степени неполного сгорания по концентрации CO относительно CO_2 (повышенное содержание CO указывает на дефицит окислителя или нарушение смесеобразования);

– появление полосы несгоревших углеводородных радикалов (3,3–3,5 мкм), что сигнализирует о расслоении компонентов или отрыве факела от стенок камеры.

Список использованных источников

1. *Берк П. У., Шумановский В. А.* Дистанционная оптическая диагностика высокотемпературных газовых потоков. – М. : Машиностроение, 2022. – 272 с.

2. *Ли Дж. А.* Уравнение переноса излучения в дисперсных средах. – М. : Мир, 2018. – 552 с.

3. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database / L. S. Rothman [et al.] // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2022. – Vol. 277. – P. 107949.

4. MODTRAN6: A major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code / A. Berk [et al.] // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 9088. – P. 90880H.

5. Atmospheric Propagation of Radiation. of The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook / F.G. Smith [et al.]; ed. by F. G. Smith. – SPIE Optical Engineering Press, 2023.– Vol. 2. – 502 p.

6. *Пенин А. Н.* Основы молекулярной оптики. – М. : Высш. шк., 2023. – 432 с.

7. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения: 25.01.2026).

8. *Klingbeil A.E., Jeffries J.B., Hanson R.K.* Temperature- and species-dependent quenching of probed by two-photon laser-induced fluorescence using a picosecond laser // Applied Physics B. – 2008. – Vol. 90. – P. 619–629.

9. Sandsten, J., Weibring, P., Edner, H.Svanberg, S. Real-time gas-correlation imaging employing thermal background radiation // Optics Express. – 2020. – Vol. 6. – P. 92–103.

10. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 2021. – 1232 с.

С. Н. Краснощёков,
кандидат военных наук;
С. Н. Лукьяненко;
Д. В. Скворцов,
кандидат технических наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

В статье предложены две методики оценки остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей, основанные на анализе данных измерения напряжения. Описаны алгоритмы обработки исходных данных и построения зависимости емкости аккумуляторов от времени эксплуатации. Приведены расчетные формулы, позволяющие оценить вероятность безотказной работы литий-ионной аккумуляторной батареи в заданный момент времени.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторные батареи, остаточный ресурс, кривая разряда, время разряда, цикл заряда-разряда.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием космической техники задача оперативного мониторинга и технической диагностики бортовых систем космического аппарата (КА) в условиях его летной эксплуатации приобретает особую значимость. Отдельного внимания в вопросах диагностики требует система электроснабжения (СЭС), являющаяся критически важной обеспечивающей системой. Одну из ведущих ролей в ней играют аккумуляторные батареи, деградационные процессы в которых влияют на срок активного существования КА. Поэтому определение их остаточного технического ресурса является важной задачей в технической диагностике КА. В связи с этим разработка методик оценки их остаточного ресурса представляет собой важную научно-практическую задачу, решение которой позволит определить текущее техническое состояние СЭС КА.

В настоящее время литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) получили широкое распространение в космической технике благодаря их высоким удельным энергетическим характеристикам. Их применение позволяет существенно снизить массу СЭС КА при сохранении требуемого энергообеспечения бортовых систем.

Проблема оценки остаточного ресурса ЛИАБ является предметом многих исследований. В работах [1, 2] проведён анализ существующих методов диагностики состояния ЛИАБ, среди которых выделены электрохимические и эмпирические подходы. В работе [3] авторы рассматривают применение различных методов определения ёмкости ЛИАБ, что позволяет оценить их остаточный технический ресурс, однако указанные методы не применимы в условиях орбитальной эксплуатации КА.

Ряд исследований посвящён изучению влияния внешних факторов на деградацию ЛИАБ. В частности, в работе [4] авторы подчёркивают значимость влияния температурного фактора на характер деградационных процессов ЛИАБ. Отдельного внимания заслуживает метод, предложенный в [5], позволяющий вычислить значение поправочного коэффициента необходимого для компенсации ошибок применения счетчика ампер-часов в ходе циклов заряда-разряда ЛИАБ без достижения её полного разряда.

Таким образом, большинство подходов к определению остаточного ресурса ЛИАБ основаны на полном разряде батареи, что ограничивает их использование только этапом наземной эксплуатации КА, либо этапом наземной экспериментальной отработки. В связи с этим

актуальной представляется задача разработки методики, позволяющей оценивать параметры деградации ЛИАБ исключительно на основе анализа телеметрируемых параметров, без необходимости проведения контролируемого полного разряда ЛИАБ.

В работе [6] предложен подход, заключающийся в использовании в качестве оцениваемого параметра времени разряда ЛИАБ между фиксированными уровнями напряжения u_1 и u_2. Для анализа данных авторы использовали нейросетевые модели. Настоящая статья посвящена разработке подхода, позволяющего оценить техническое состояние ЛИАБ в произвольный момент времени орбитальной эксплуатации КА с использованием аналитических зависимостей, описывающих физику процессов функционирования ЛИАБ и деградации их параметров. Указанный подход реализован в двух методиках, представленных в статье.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕКУЩЕГО ЦИКЛА ЗАРЯДА-РАЗРЯДА

Рассмотрим множество измеренных значений напряжения $\{u_k | k = \overline{1,N}\}$ (где N – количество измерений, соответствующих текущему циклу заряда-разряда), полученных в результате обработки ТМИ. На основании указанных данных строится кривая разряда, отражающая текущее состояние ЛИАБ. Анализ данной зависимости позволяет определить время разряда $\Delta t_{\text{тек}}$, соответствующее интервалу между указанными ранее характерными точками разрядного процесса u_1 и u_2 (рис. 1).

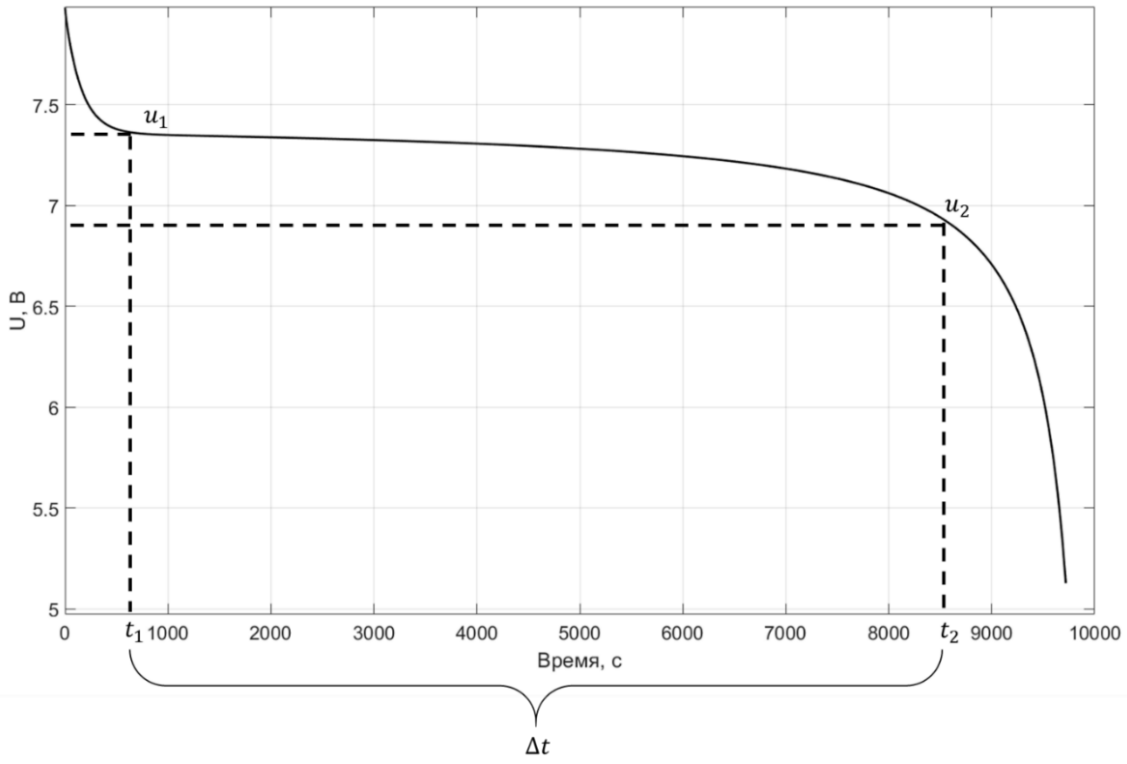


Рис. 1. Определение времени разряда Δt по кривой разряда

В работах [4, 7–10] представлены математические модели ЛИАБ, описывающие зависимость напряжения на клеммах ЛИАБ от внешних факторов, включая силу протекающего тока разряда, температуру корпуса, глубину разряда. В частности, в работе [8] приведена математическая модель Шеферда, связывающая величину напряжения со значением силы тока

разряда. В работах [9, 10] данная модель дополняется с учетом воздействия температурных факторов, а также процессов деградации. На основе этих моделей возможно осуществить моделирование процессов функционирования ЛИАБ в различных условиях эксплуатации.

В рамках первой методики предлагается построить K кривых разряда для различных значений емкости ЛИАБ, включая критическое значение $Q_{\text{кон}}$, соответствующее предельному состоянию ЛИАБ. Обозначим за Q_g емкость ЛИАБ для цикла заряда-разряда Nc_g ($g = \overline{1,K}$). Моделирование должно проводиться при идентичных условиях разряда, соответствующих данным ТМИ. Примем $Nc_{\text{кон}} = Nc_K$ в качестве максимального количества циклов заряда-разряда, через которое ЛИАБ достигнет предельного состояния при 100%-ной глубине разряда и номинальном токе заряда и разряда. Тогда для произвольного цикла заряда-разряда Nc_g коэффициент деградации ε_g будет определяться из уравнения

$$\varepsilon_g = \frac{Nc_g}{Nc_{\text{кон}}}. \quad (1)$$

В данном случае величина емкости ЛИАБ определяется по формуле [9]

$$Q_g = Q_{\text{н}} - (Q_{\text{н}} - Q_{\text{кон}}) \cdot \varepsilon_g, \quad (2)$$

где $Q_{\text{н}}$ – номинальная емкость ЛИАБ, устанавливаемая производителем.

Подстановка значения емкости Q_g ЛИАБ в уравнения математической модели [9] позволяет сформировать расчетную кривую разряда, т. е. построить в ходе моделирования зависимость напряжения на клеммах ЛИАБ от времени функционирования для текущего цикла заряда-разряда Nc_g. Для дальнейшего полного анализа деградационных процессов необходимо построение K таких кривых (рис. 2), позволяющих проследить изменение параметров ЛИАБ в течение всего срока эксплуатации.

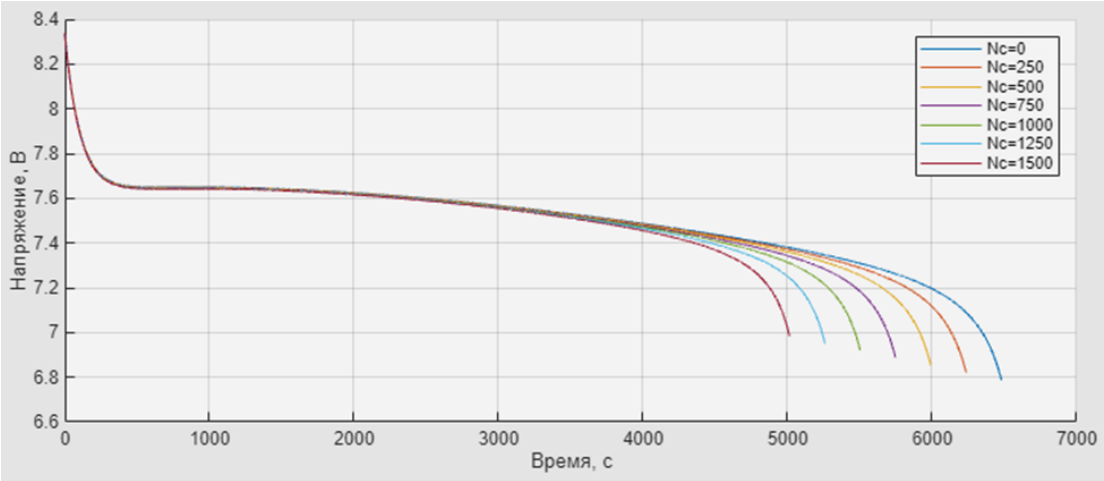


Рис. 2. Кривые разряда ЛИАБ для различных значений Nc

Далее для каждой смоделированной кривой разряда определяется промежуток времени, в течение которого напряжение на клеммах ЛИАБ изменится от u_1 до u_2. Полученные значения формируют массив данных из K элементов, отражающий зависимость числа циклов заряда-разряда от времени разряда Δt, что показано на рис. 3.

Используя полученную зависимость $Nc = Nc(\Delta t)$ между количеством эквивалентных полных циклов заряда-разряда и временем разряда, определяется текущее значение $Nc_{\text{тек}}$ (рис. 3), характеризующее состояние ЛИАБ. На основании этого показателя остаточный ресурс ЛИАБ $Nc_{\text{ост}}$ определяется по формуле

$$Nc_{\text{ост}} = Nc_{\text{кон}} - Nc_{\text{тек}}. \quad (3)$$

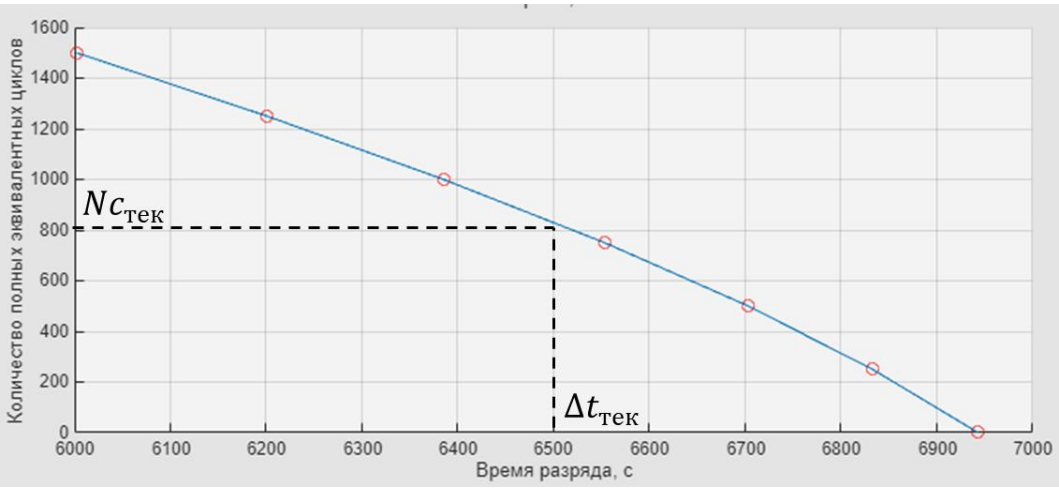


Рис. 3. Определение текущего количества эквивалентных полных циклов заряда-разряда

Алгоритм определения оставшегося количества эквивалентных полных циклов заряда-разряда представлен на рис. 4.

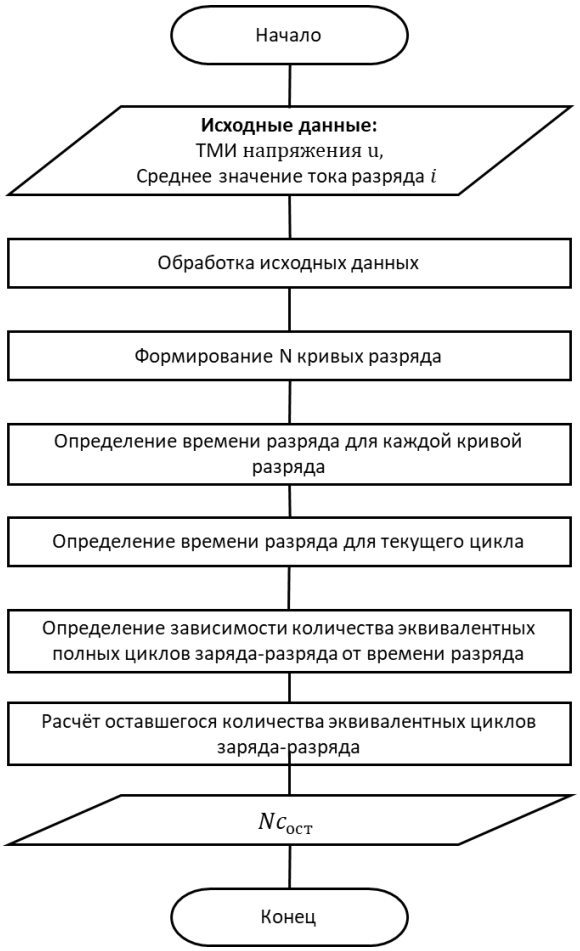


Рис. 4. Алгоритм определения оставшегося количества эквивалентных циклов заряда-разряда

Таким образом, в основе предложенной методики лежит процесс моделирования функционирования ЛИАБ на этапе орбитальной эксплуатации с целью построения зависимости ко-

личества эквивалентных циклов заряда-разряда от времени разряда для определения остаточного ресурса ЛИАБ.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ВСЕХ ЦИКЛОВ ЗАРЯДА-РАЗРЯДА

Рассмотрим множество измеренных значений напряжения $\{u_{g,k} | k = \overline{1, N_g}, g = \overline{1, K}\}$ (где N_g – количество измерений, соответствующих циклу заряда-разряда g; K – количество циклов заряда-разряда, прошедших от начала функционирования ЛИАБ до текущего момента времени). Пусть для каждого цикла g формируется разрядная характеристика, отражающая состояние ЛИАБ для этого цикла. Тогда для каждой такой кривой разряда определим время разряда Δt_g (см. рис. 1). Значения силы тока, при которых происходит разряд во всех циклах, должны быть одинаковыми.

Таким образом, результатом обработки будет K значений времени разряда Δt ЛИАБ. Обработка этого массива позволит определить значение скорости изменения времени разряда v_k в момент времени τ_k (где τ_k – момент времени начала цикла k):

$$v_g = \frac{\Delta t_g - \Delta t_{g-1}}{\tau_g - \tau_{g-1}}. \quad (4)$$

Процесс изменения параметра Δt со скоростью v_g является случайным и зависит от множества факторов. В результате происходит формирование закона распределения $p(v_g)$, который определяет вероятность выхода параметра Δt за границу $\Delta t_{\text{кон}}$, т. е. вероятность отказа $F(t) = 1 - P(t)$ [11]. Величина $\Delta t_{\text{кон}}$ отражает состояния ЛИАБ при критическом значении емкости ЛИАБ $Q_{\text{кон}}$. Для ее определения необходимо подставить значения емкости $Q_{\text{кон}}$ в уравнения математической модели [9], что позволит сформировать кривую разряда, характеризующую ЛИАБ в предельном состояния и определить значение $\Delta t_{\text{кон}}$.

Скорость изменения времени разряда зависит от множества факторов, поэтому она подчинена нормальному закону распределения. Математическое ожидание скорости изменения времени разряда определяется по формуле

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_i, \quad (5)$$

где n – количество элементов массива v.

Дисперсия скорости изменения определяется из выражения

$$D(v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (v_i - \bar{v})^2. \quad (6)$$

Таким образом, функция распределения плотности вероятности для скорости изменения времени разряда при нормальном (гауссовском) законе распределения случайной величины будет иметь вид

$$p(v_{\text{тек}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(v_{\text{тек}} - \bar{v})^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение скорости изменения времени разряда.

График функции распределения плотности вероятности представлен на рис. 5.

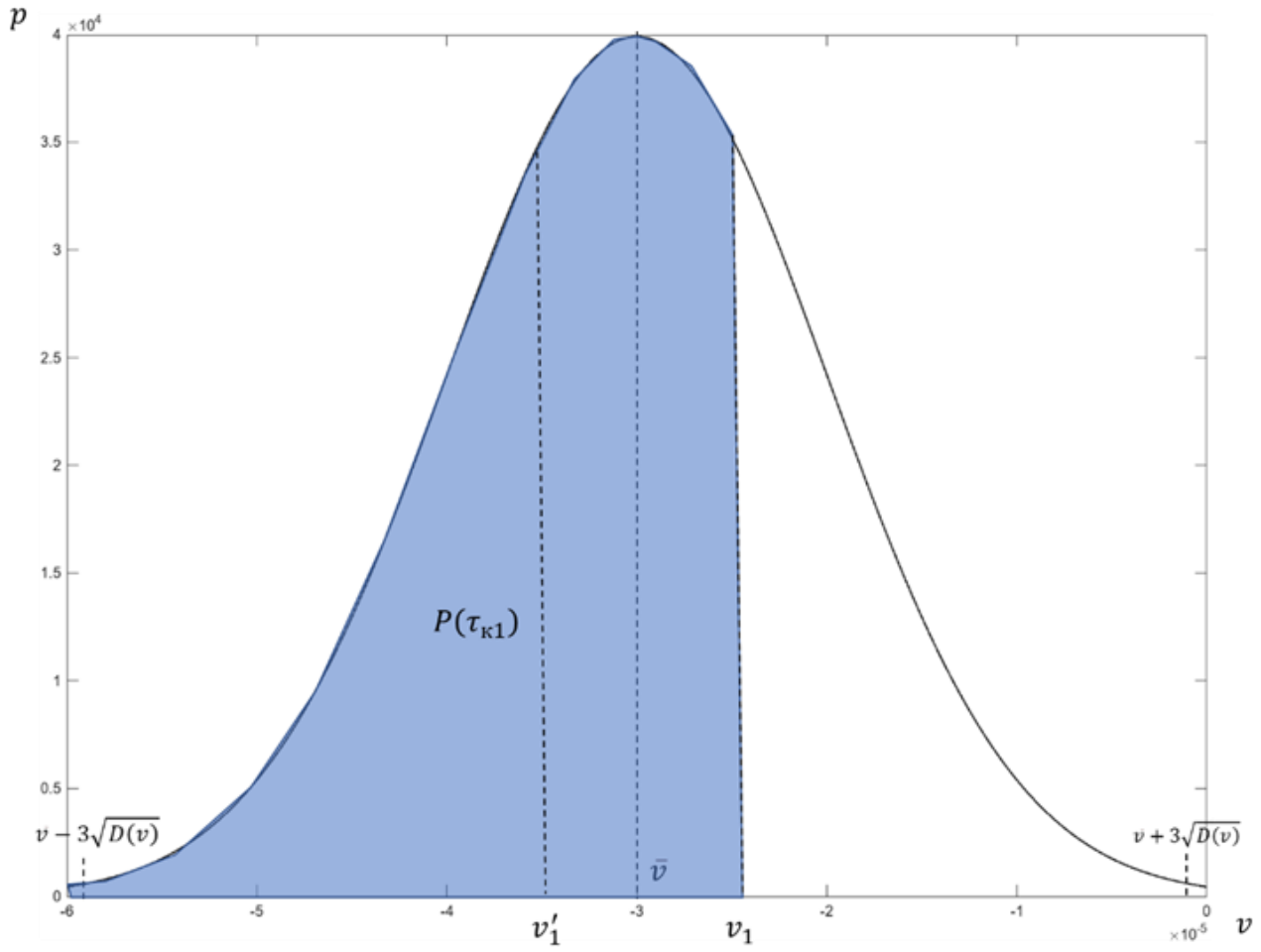


Рис. 5. Функция распределения плотности вероятности для скорости изменения времени разряда

В текущий момент времени $\tau_{тек} = \tau_n$ $v_{тек} = v_n$ и, соответственно, $\Delta t_{тек} = \Delta t_n$. Так как в конечный момент времени $\tau_{кон}$ время разряда составит $\Delta t_{кон}$, то учитывая, что $v_{тек} = \frac{\Delta t_{кон} - \Delta t_{тек}}{\tau_{кон} - \tau_{тек}}$, получим

$$\tau_{кон} = \tau_{тек} + \frac{\Delta t_{кон} - \Delta t_{тек}}{v_{тек}}. \quad (7)$$

При $\tau_{кон}$ наступает предельное состояние, которое и определяет остаточный ресурс. Следовательно, $\tau_{кон}$ является функцией случайного аргумента [11].

Таким образом, вероятность безотказной работы (ВБР) ЛИАБ на промежутки времени $(\tau_{тек}; \tau)$ (рис. 6) определяется из соотношения [11]

$$P(\tau) = 0{,}5 + \Phi\left(\frac{\Delta t_{кон} - \bar{v}(\tau - \tau_{тек})}{(\tau - \tau_{тек})\sigma}\right), \quad (8)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функция Лапласа, определяется по специальной таблице [12].

Алгоритм определения ВБР ЛИАБ в определенный момент времени на основе данных ТМИ представлен на рис. 7.

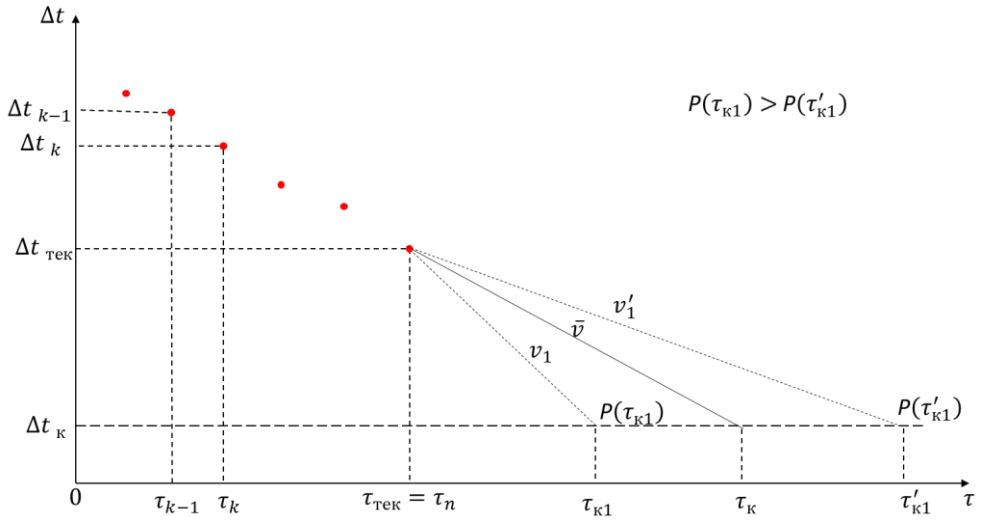


Рис. 6. Вероятность безотказной работы в момент времени $\tau_к$

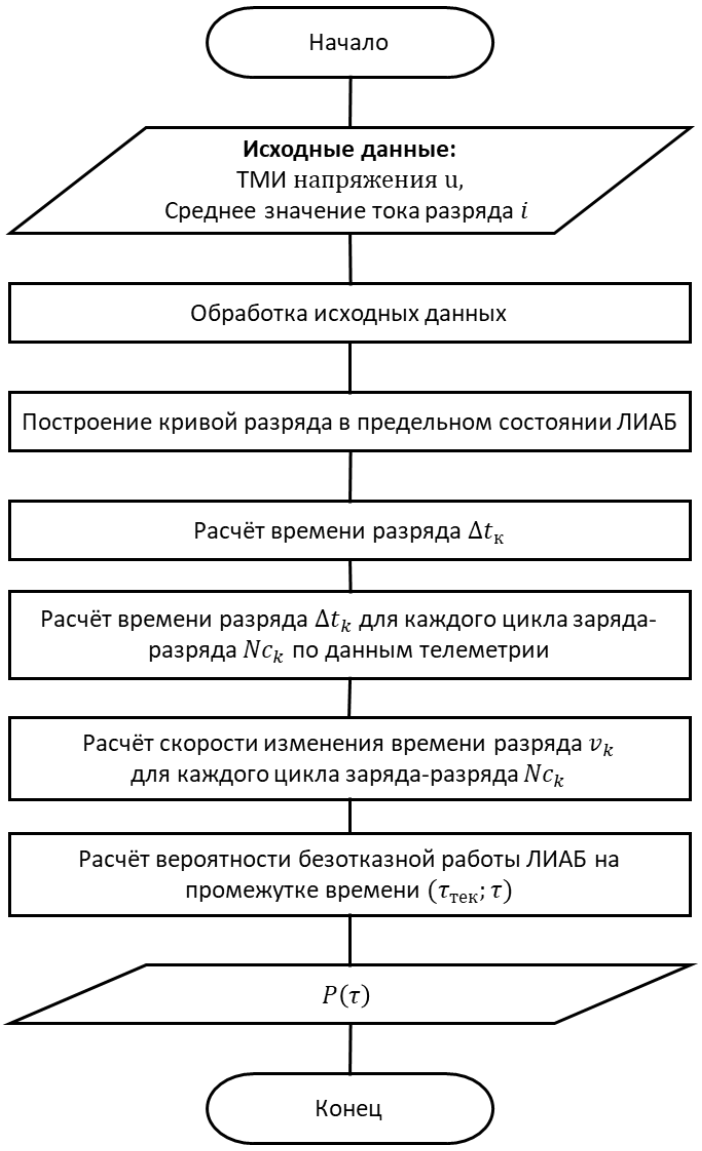


Рис. 7. Алгоритм определения ВБР ЛИАБ

Важно отметить, что данная методика позволяет получить более достоверные результаты, так как использует большее количество данных, полученных в ходе орбитальной эксплуатации КА. При наличии полной истории функционирования ЛИАБ рекомендуется применять данную методику. Однако опыт эксплуатации КА свидетельствует о том, что не всегда такая возможность есть, следовательно, для решения задачи определения остаточного ресурса ЛИАБ применяется первая методика. Это расширяет возможности для оценки технического состояния ЛИАБ и СЭС в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные методики позволяют оценить остаточный технический ресурс ЛИАБ по данным телеметрии напряжения на их клеммах. В основе каждой из методик лежит использование времени разряда в качестве ключевого параметра для косвенного определения значения емкости ЛИАБ. Различие между ними заключается в способах применения математической модели ЛИАБ. В одном случае она используется для моделирования процессов функционирования при различных циклах заряда-разряда на протяжении всего срока функционирования, в другом – для прогнозирования поведения батареи в предельном состоянии. Применение данных методик специалистами, анализирующими телеметрию, позволяет не только оценить текущее состояние ЛИАБ на КА, но и спрогнозировать динамику их параметров в процессе эксплуатации.

Кроме того, полученные зависимости дают возможность установить связь между ВБР ЛИАБ и продолжительностью их функционирования, что имеет принципиальное значение для решения задач технической диагностики. Такой подход позволяет перейти от мониторинга состояния ЛИАБ к управлению их ресурсом, повышая тем самым надежность СЭС КА в целом.

Список использованных источников

1. *Дыбля Ю. В., Крылова О. С., Яковлев К. В.* Расчет аккумуляторных батарей космических аппаратов спутниковой системы связи на низкой круговой орбите // Инновационная наука. – 2020. – Вып. 4 – С. 31–34.

2. *Шамарова Н. А.* Анализ методов оценки уровня заряда аккумуляторных батарей // Вестник КГЭУ. – 2022. – Т. 14, № 1(53) – С. 24–33.

3. *Галузин Т. А., Джамалов Н. К.* Обзор методов определения емкости и уровня заряда аккумуляторов // Проблемы науки / Казахский национальный университет имени Аль-Фараби. – 2020. – Вып. 4 (52). – С. 21–24.

4. *Хандорин М. М., Букреев В. Г.* Методика оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи при изменении температуры аккумулятора // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 21, № 2. – С. 120–122.

5. *Хандорин М. М., Букреев В. Г.* Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора на основе эталонной модели // Решетневские чтения. – 2013. – С. 80–82.

6. Спутниковое прогнозирование оставшегося срока службы литий-ионных аккумуляторов с использованием нового косвенного индикатора работоспособности // Energies. – 2013. – Вып. 6. – С. 3654–3668.

7. *Давидов А. О., Жмуров Б. В., Степанченко В. П.* Факторы, влияющие на скорость деградации литий-ионных аккумуляторов // Электропитание : научно-техн. журн. – 2023. – С. 36–53.

8. *Брянцев А. А., Букреев В. Г.* Алгоритм определения параметров модели Шеферда // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 1 – С. 95–99.

9. *Добрего К. В., Бладыко Ю. В.* Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2021. – Т. 64, № 1 – С. 27–39.

10. *Краснощёков С. Н. , Лукьяненко С. Н., Скворцов Д. В.* Применение математической модели литий-ионной аккумуляторной батареи для определения остаточного ресурса на основе телеметрируемых параметров силы тока // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2025. – Вып. 697. – С. 341–350.

11. *Острейковский В. А.* Теория надежности : учебник для вузов. – М. : Высш. шк., 2003. – 463 с.

12. *Большев Л. Н., Смирнов Н. В.* Таблицы математической статистики. – М. : Наука, 1983. – 416 с.

С. Н. Краснощёков,
кандидат военных наук;
В. А. Сиволап,
кандидат технических наук;
Д. В. Скворцов,
кандидат технических наук;

ОБОСНОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НАКОПЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА СВЕРХНИЗКООРБИТАЛЬНОГО МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ДВИГАТЕЛЕМ МАЛОЙ ТЯГИ

Представлено обоснование требования к системе сбора и хранения атмосферного газа (коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника) при движении низкоорбитального малого космического аппарата (МКА) с двигательной установкой малой тяги. С применением математических моделей движения низкоорбитального МКА с двигательной установкой малой тяги при использовании системы накопления атмосферного газа (рабочего тела), получены результаты численных экспериментов для различных диапазонов траекторных трубок.

Ключевые слова: малый космический аппарат, двигатель малой тяги, сверхнизкая орбита, простейшая программа управления, воздухозаборник.

ВВЕДЕНИЕ

Достижения в области создания, моделирования и применения [1–8] малых космических аппаратов (МКА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) малой тяги [9–13] сделали возможным реализацию проектов низкоорбитальных МКА, в том числе МКА с двигательными установками (ДУ), которые способны к накоплению атмосферного газа (рабочего тела) [14–17]. При этом рассматриваются различные схемы применения и реализации [14, 17] таких ДУ. В частности, в одной из схем [14] предполагается, что МКА выполняет заданный маневр после или в процессе накопления нужного количества газа.

Настоящая статья посвящена вопросу обоснования требований к системе сбора и хранения атмосферного газа (накопителя рабочего тела) при движении низкоорбитального МКА с ДУ малой тяги. Поэтому в работе поставлена задача разработки модели и проведения численных экспериментов исследования простейшей программы управления процесса перехода на новую орбиту и поддержания параметров орбиты в заданной трубке орбит с постоянным накоплением атмосферного газа (рабочего тела).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Движение МКА осуществляется на так называемых «сверхнизких орбитах», на высотах 180–300 км. ДУ МКА состоит из электроракетного двигателя (ЭРД), накопителя рабочего тела и устройства забора атмосферных газов (далее – воздухозаборник).

Предполагается, что двигатель аппарата нерегулируемый, скорость истечения и тяга постоянные, а направление тяги коллинеарное вектору скорости центра масс. Движение центра масс аппарата в пределах заданной орбитальной трубки высот вблизи некоторой круговой (опорной) орбиты представляет собой последовательность циклов с одинаковой продолжительностью. Каждый из последовательности циклов содержит активные и пассивные участки, на которых основное управление принимает значение 1 или 0 соответственно.

Секундный приход массы рабочего тела через воздухозаборник накопителя составляет

$$q_v = \rho v S, \tag{1}$$

где ρ – плотность атмосферы, которая является функцией от высоты (h) полета: $\rho = f(h)$;
v – скорость движения МКА, равная скорости набегающего потока, при неподвижной атмосфере;
S – площадь входа воздухозаборника.

Учитывая секундный приход массы рабочего тела (q_v) и время существования МКА (t_m), можно определить приход полной массы рабочего тела через воздухозаборник:

$$m_v = q_v t_m. \tag{2}$$

При проведении численных экспериментов время существования МКА (t_m) определяется как время моделирования.

Известно [14, 15, 18], что реактивная тяга двигателя $P=qV$, где V – скорость истечения реактивной струи двигателя, q – расход рабочего тела через двигатель. Следовательно, расход массы рабочего тела за суммарное время работы двигателя (при условии постоянства тяги и скорости истечения) определяется по формуле

$$m_r = q \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = P \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i / V. \tag{3}$$

Если учесть коэффициент использования рабочего тела двигателем (k_r), то получим полную массу рабочего тела, израсходованную за все время работы двигателя,

$$m_{rt} = m_r / k_r. \tag{4}$$

Захваченная через воздухозаборник масса рабочего тела накапливается с учетом коэффициента накопления рабочего тела (k_v).

Зная полную массу рабочего тела (m_{rt}), израсходованную за все время работы двигателя, и массу атмосферного газа (m_v), захваченную через воздухозаборник, определим нижнюю границу КПД накопителя рабочего тела:

$$k_v = m_{rt} / m_v. \tag{5}$$

Для исследования движения низкоорбитального КА используется модель движения с учетом несферичности Земли, аэродинамических сил, вызванных наличием «остаточной» атмосферы на орбитах высотой 180–300 км, работы двигательной системы с нерегулируемой тягой управления, которая осуществляется включением-выключением двигательной установки. Система дифференциальных уравнений при этом может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{v} \\ \dot{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{r}) + \boldsymbol{u} + \boldsymbol{F} \end{cases}, \tag{6}$$

Здесь $\boldsymbol{r}$ – радиус-вектор КА, $\boldsymbol{r} = (x, y, z)^{\mathrm{T}}$;
r – модуль радиуса-вектора КА, $r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$;
$\boldsymbol{v}$ – вектор скорости КА, $\boldsymbol{v} = \left(v_x, v_y, v_z\right)^{\mathrm{T}}$;
v – модуль вектора скорости КА, $v = |\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$;
$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{r})$ – вектор ускорения силы тяготения Земли, $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{r}) = -\frac{\mu \boldsymbol{r}}{r^3}$ (где μ – гравитационный параметр Земли);
$\boldsymbol{u}$ – реактивное ускорение, сообщаемое двигателем, которое определяется выражением

$$\boldsymbol{u} = \delta \cdot \left(u_{Px}\ u_{Py}\ u_{Pz}\right)^T = \delta \cdot \begin{pmatrix} \frac{P_x}{m} \\ \frac{P_y}{m} \\ \frac{P_z}{m} \end{pmatrix}, \tag{7}$$

где $\boldsymbol{P} = (P_x \quad P_y \quad P_z)^T$ – вектор тяги в ОСК; $\delta \in \{1, 0\}$ – функция включения-выключения двигательной установки, принимающая значения 1 и 0; m – масса КА.

Сумма возмущающих сил $\boldsymbol{F}$, действующих на КА, определяется формулой

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F_R} + \boldsymbol{F_{J2}} + \boldsymbol{F_e} + \boldsymbol{F_c}. \tag{8}$$

Ускорение $\boldsymbol{F_R}$, возникшее вследствие торможения в атмосфере, – формулой

$$\boldsymbol{F_R} = \left(f_{Rx} \;\; f_{Ry} \;\; f_{Rz}\right)^T = \begin{pmatrix} \frac{b}{2}\rho v^2[a_{11} + k(a_{21}\cos\gamma) + a_{31}\sin\gamma] \\ \frac{b}{2}\rho v^2[a_{12} + k(a_{22}\cos\gamma) + a_{32}\sin\gamma] \\ \frac{b}{2}\rho v^2[a_{13} + k(a_{23}\cos\gamma) + a_{33}\sin\gamma] \end{pmatrix}, \tag{9}$$

где b – баллистический коэффициент, $b = \frac{c_x S}{m}$, где c_x – коэффициент лобового сопротивления; S – площадь миделевого сечения, определяемая как проекция плоскости КА на плоскость, перпендикулярную направлению вектора скорости полета; m – масса КА;

ρ – плотность атмосферы на высоте полета КА, определяемая в соответствии с моделью стандартной атмосферы [19];

k – аэродинамическое качество, $k = \frac{c_y}{c_x}$, где c_y – коэффициент подъемной силы;

v – модуль вектора скорости КА, $v = \|\boldsymbol{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$;

γ – угол крена КА;

a_{ij} – направляющие косинусы для соответствующих направлений между поточной системой координат и гринвичской системой координат.

Возмущающее ускорение со стороны второй зональной гармоники (J_2) – $\boldsymbol{F_{J2}}$ определяется формулой

$$\boldsymbol{F_{J2}} = -\frac{3}{2}\mu J_2 \frac{R_{3э}^2}{r^5}\begin{pmatrix} \left[1 - \frac{5z^2}{r^2}\right]x \\ \left[1 - \frac{5z^2}{r^2}\right]y \\ \left[3 - \frac{5z^2}{r^2}\right]z \end{pmatrix}, \tag{10}$$

где J_2 – коэффициент при второй зональной гармонике;

$R_{3э}$ – экваториальный радиус Земли;

x, y, z – координаты центра масс КА.

Переносное ускорение $\boldsymbol{F_e}$ определяется формулой

$$\boldsymbol{F_e} = \boldsymbol{\omega}_3 \times (\boldsymbol{\omega}_3 \times \boldsymbol{r}) = \left(f_{ex} \;\; f_{ey} \;\; f_{ez}\right)^T = \begin{pmatrix} -x\omega_3^2 \\ -y\omega_3^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{11}$$

Кориолисово ускорение $\boldsymbol{F_c}$ – формулой

$$\boldsymbol{F_c} = \boldsymbol{2\omega}_3 \times \boldsymbol{v} = \left(f_{cx} \;\; f_{cy} \;\; f_{cz}\right)^T = \begin{pmatrix} -2\omega_3 v_y \\ 2\omega_3 v_x \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{12}$$

где ω_3 – угловая скорость вращения Земли.

Рассмотренная модель реализована средствами MATLAB и включена в состав программного комплекса имитационного моделирования [20].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численные результаты получены при следующих исходных данных:

– данные атмосферы [19], в виде выделенной (для высот 150–300 км) базы данных плотности атмосферы в зависимости от высоты;

– параметры Земли [21, 22];

– тактико-технические характеристики (ТТХ) космического аппарата (КА);

– параметры начального положения КА на орбите.

Полный набор параметров моделирования приведен в табл. 1.

Таблица 1

Набор параметров моделирования

Параметры Земли (ПЗ-90.11) [21, 22]		
Гравитационная постоянная Земли, μ	398600,4418	км^3/с^2
Вторая зональная гармоника, J_2	1,082263e-3	
Угловая скорость вращения Земли, $\omega_З$	7,292115e-5	рад/с
Экваториальный радиус Земли, $R_{З}$,	6378136,0	м
Сжатие Земли, α	1/298,25784	
Атмосфера		
Высота орбиты, h	[180 - 300]	км
Плотность атмосферы, ρ	$\rho=f(h)$ база данных ГОСТ [16]	кг/м^3
Тактико-технические характеристики КА		
Масса, m	250,0	кг
Миделево сечение, S	0,84	м^2
Коэффициенты аэродинамического сопротивления, $[c_x, c_y, c_z]$	[2, 0, 0]	
Тяга двигательной установки, P	0,015	н
Коэффициент использования рабочего тела двигателя, η	0,6	
Параметры начального положения КА на орбите		
Наклонение, i	96,673	град
Долгота восходящего узла, Ω	53,936	град
Большая полуось, a	6572271,0	м
Эксцентриситет, e	0,000541	
Аргумент перигей, ω	226,348	град
Истинная аномалия, ϑ	0	град

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численные эксперименты проведены на интервале в 220 суток с одиннадцатью участками по 20 суток с реализацией простейшего закона управления удержания орбиты в различных заданных орбитальных трубках (диапазонах высот). При этом в каждом эксперименте рассчитывались:

– масса рабочего тела (атмосферного газа), захваченная через воздухозаборник;

– масса израсходованного двигателем рабочего тела на активных участках;

– масса израсходованного рабочего тела с учетом коэффициента использования рабочего тела двигателя;

– нижняя граница коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборником для обеспечения работы ДУ при переходе на новую орбиту и удержании орбиты в заданном слое (диапазоне высот).

Кроме того, в табл. 2 представлена нижняя граница коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника, удовлетворяющая всем участкам численного эксперимента.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования

№ эксперимента	Диапазон времени моделирования, сут.	Границы траекторных трубок (диапазон высот), км	Масса захваченного атмосферного газа, кг	Масса израсходованного рабочего тела, кг	Масса израсходованного рабочего тела с учетом коэффициента использования, кг	Низшая граница коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника
	t-mod	R	mV	mt	mt1=mt/η	kpd-V
1	0–20	6566–6576	2.6759	1.0483	1.7471	0.65
2	20–40	6566–6576	2.7781	1.0698	1.7830	0.64
3	40–60	6566–6572	2.8545	1.1050	1.8416	0.65
4	60–80	6576–6586	2.1614	0.9269	1.5448	0.71
5	80–100	6566–6572	2.8543	1.0379	1.7299	0.61
6	100–120	6568–6572	2.7718	1.1020	1.8366	0.66
7	120–140	6565–6570	3.0574	1.1898	1.9830	0.65
8	140–160	6565–6568	3.1000	1.2093	2.0155	0.65
9	160–180	6564.5–6570	3.0975	1.2095	2.0158	0.65
10	180–200	6564.5–6568	3.1659	1.2593	2.0988	0.66
11	200–220	6574–6578	2.3804	1.0010	1.6684	0.70
Нижняя граница коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника = max(kpd-V)						**0,71**

На графиках (рис. 1–11) представлен пример движения низкоорбитального МКА в заданных орбитальных трубках (диапазонах высот) на 20-суточных участках при заданном коэффициенте использования рабочего тела двигателя (k_r = 0,6).

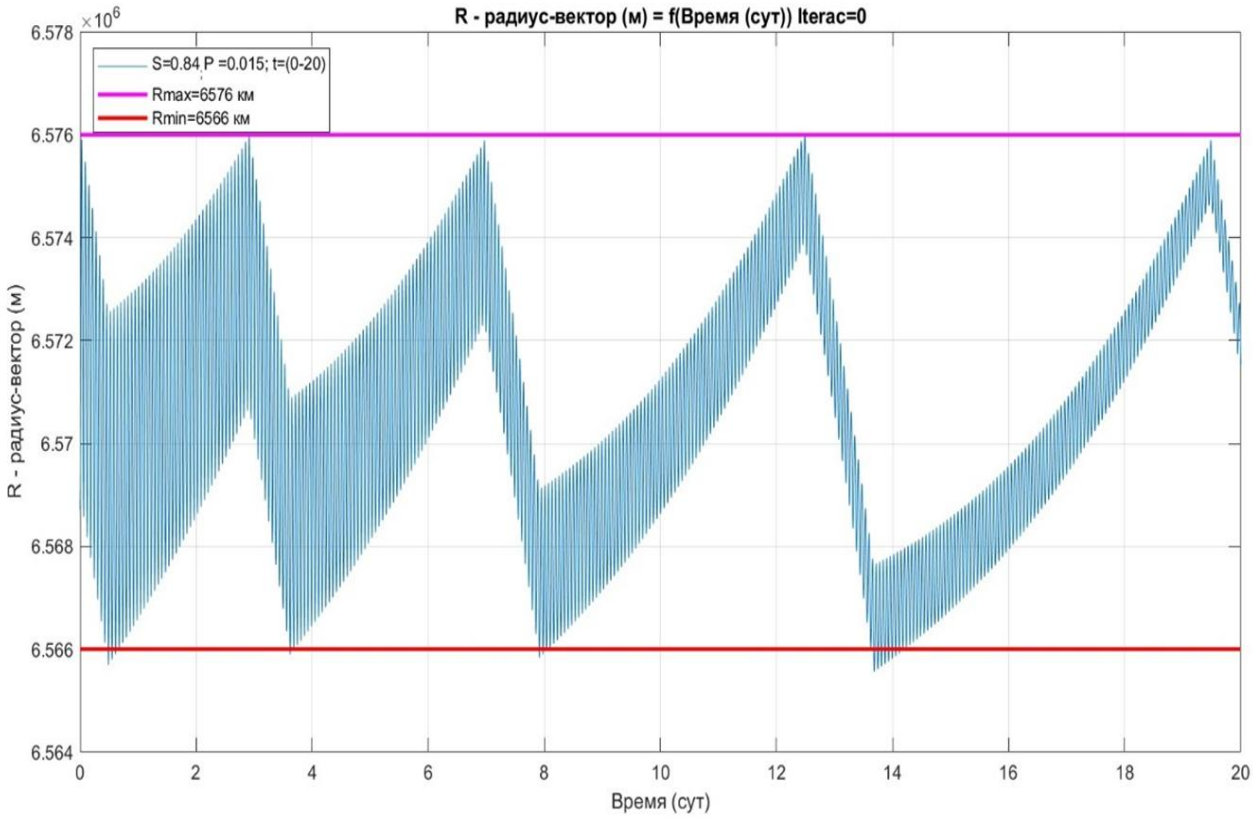


Рис. 1. Движение КА в трубке R = [6566, 6576] км (итерация 0)

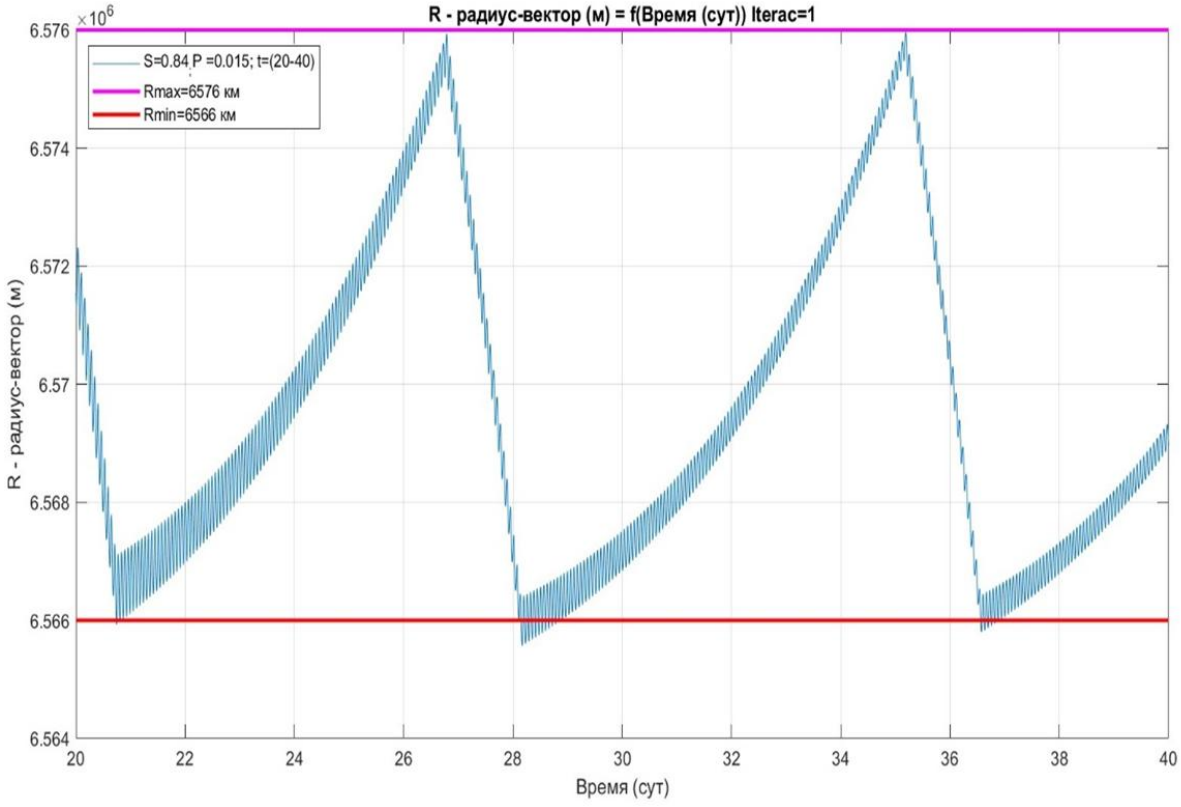


Рис. 2. Движение КА в трубке R = [6566, 6576] км (итерация 1)

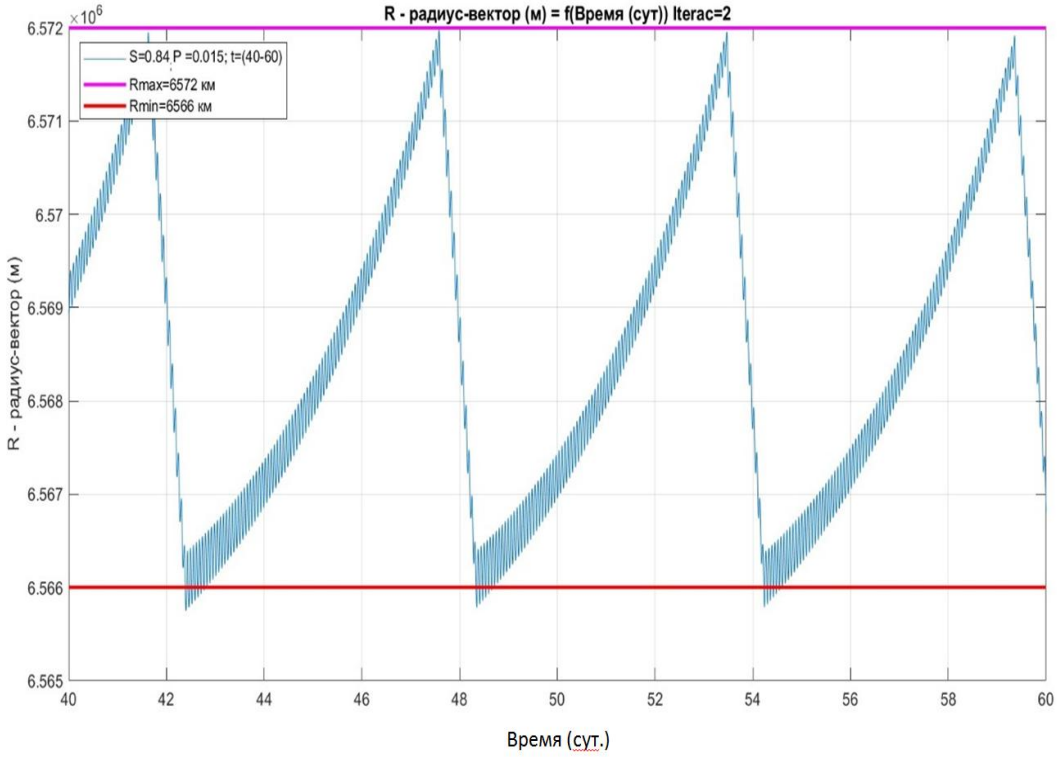


Рис. 3. Движение КА в трубке R = [6566, 6572] км (итерация 2)

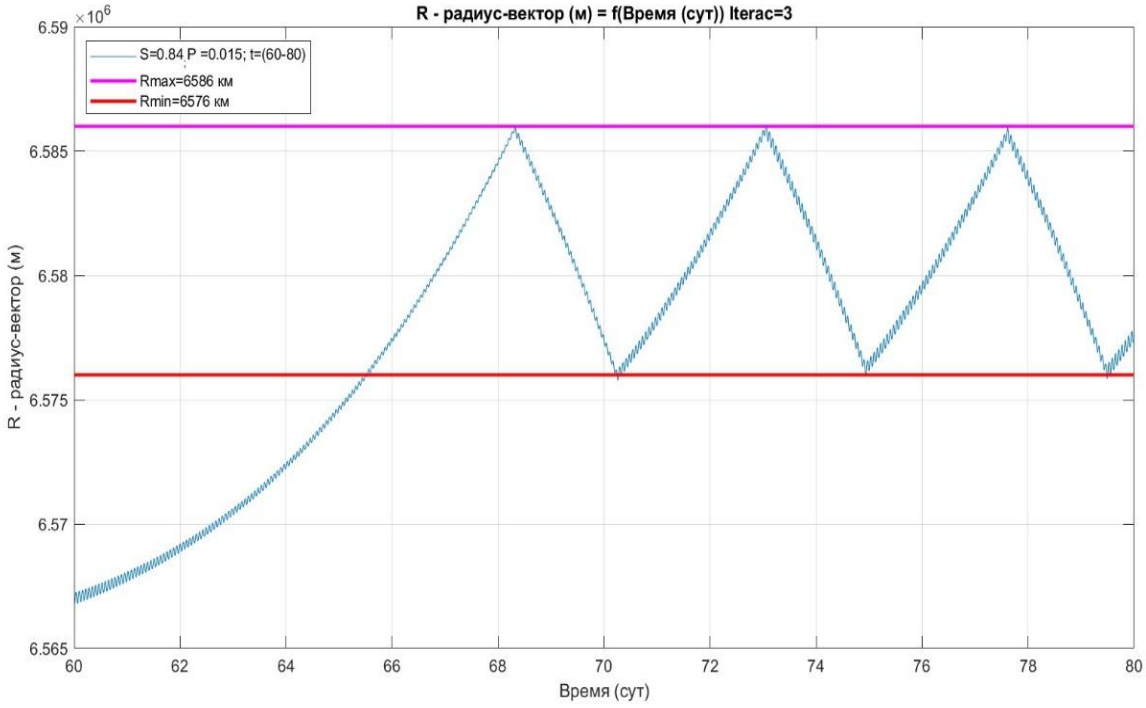


Рис.4. Движение КА в трубке R = [6576, 6586] км (итерация 3)

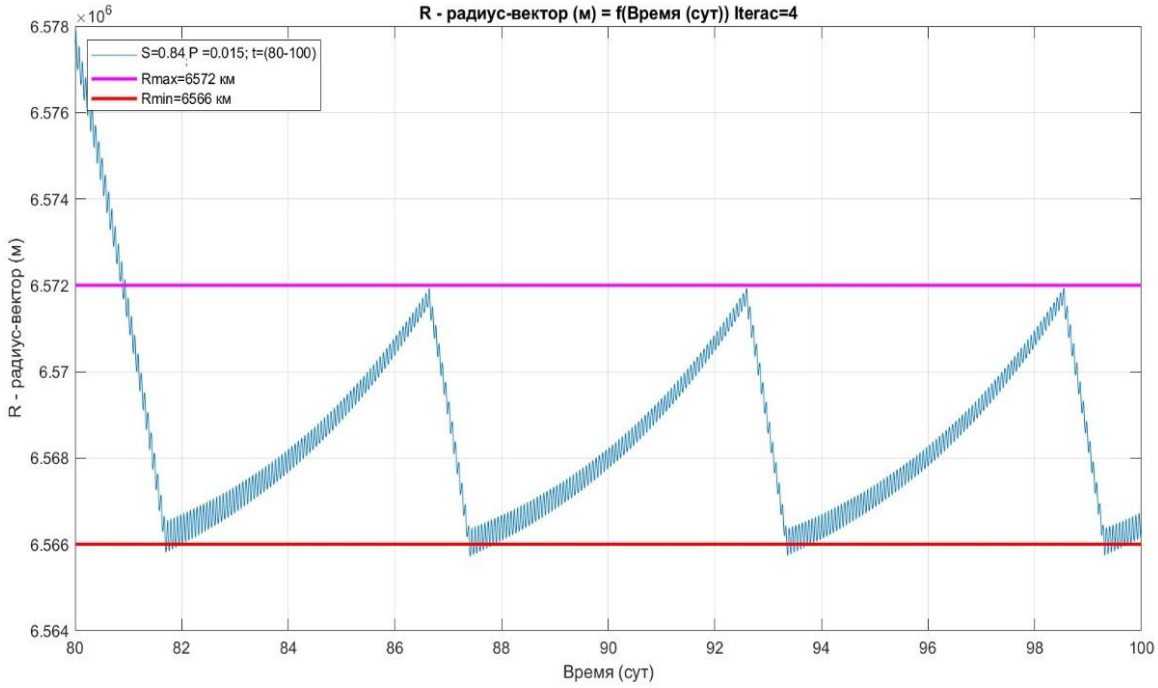


Рис. 5. Движение КА в трубке R = [6566, 6572] км (итерация 4)

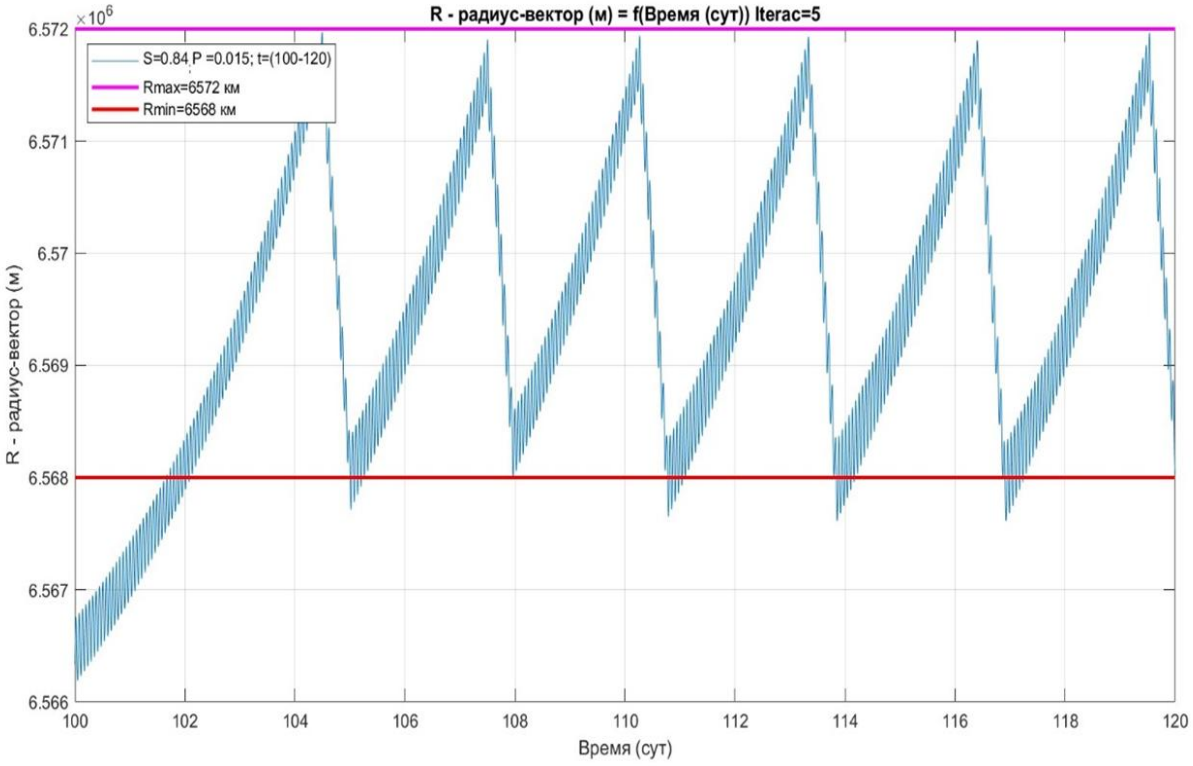


Рис. 6. Движение КА в трубке R = [6568, 6572] км (итерация 5)

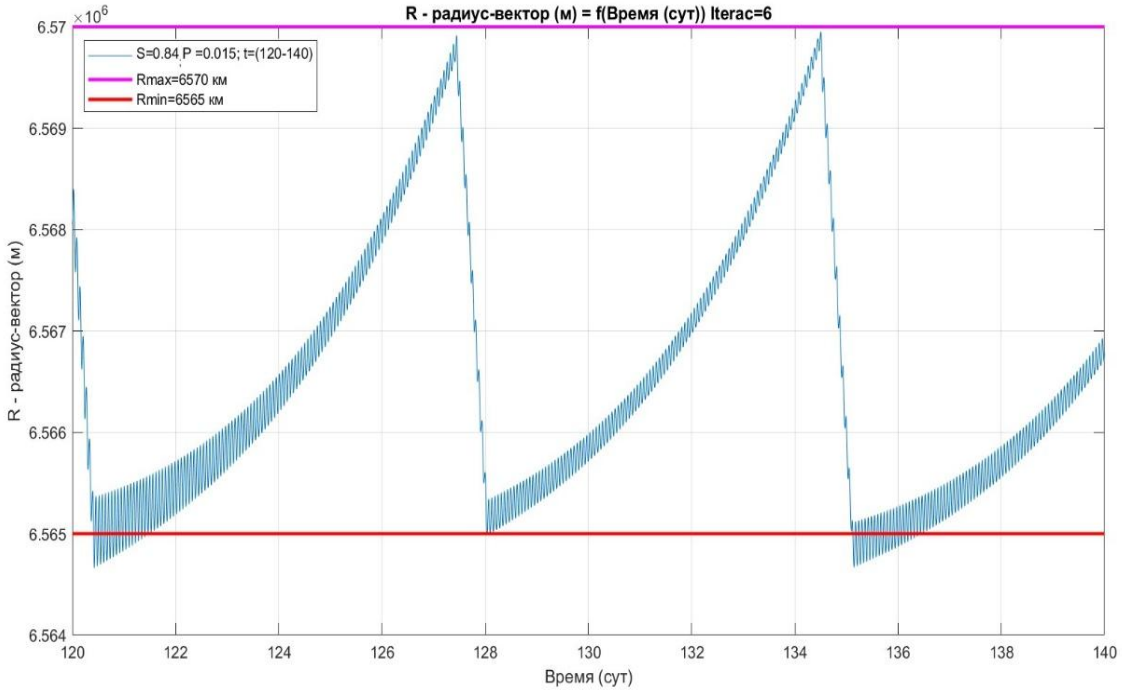


Рис. 7. Движение КА в трубке R = [6565, 6570] км (итерация 6)

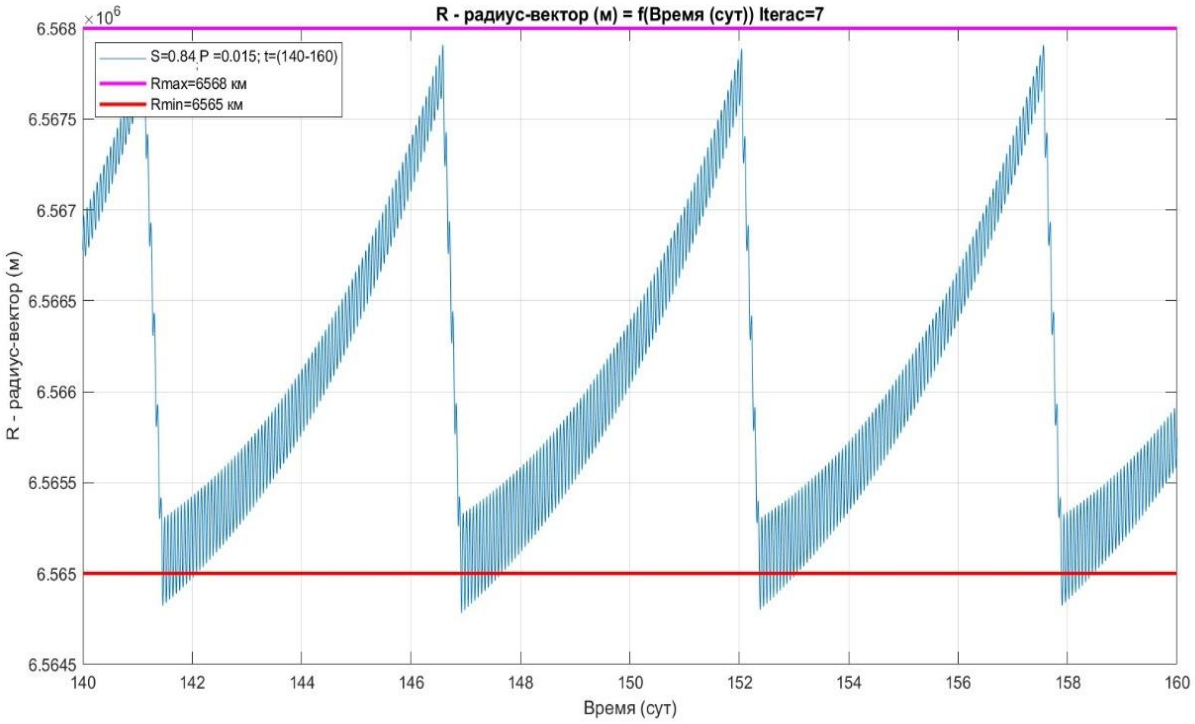


Рис. 8. Движение КА в трубке R = [6565, 6568] км (итерация 7)

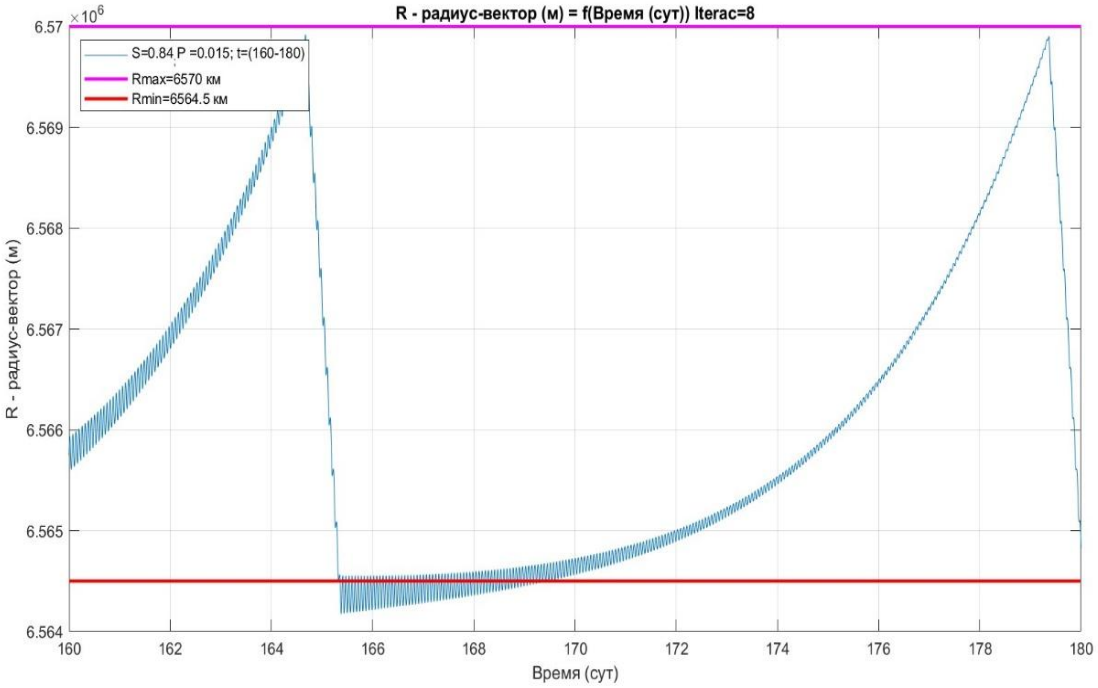


Рис. 9. Движение КА в трубке R = [6564.5, 6570] км (итерация 8)

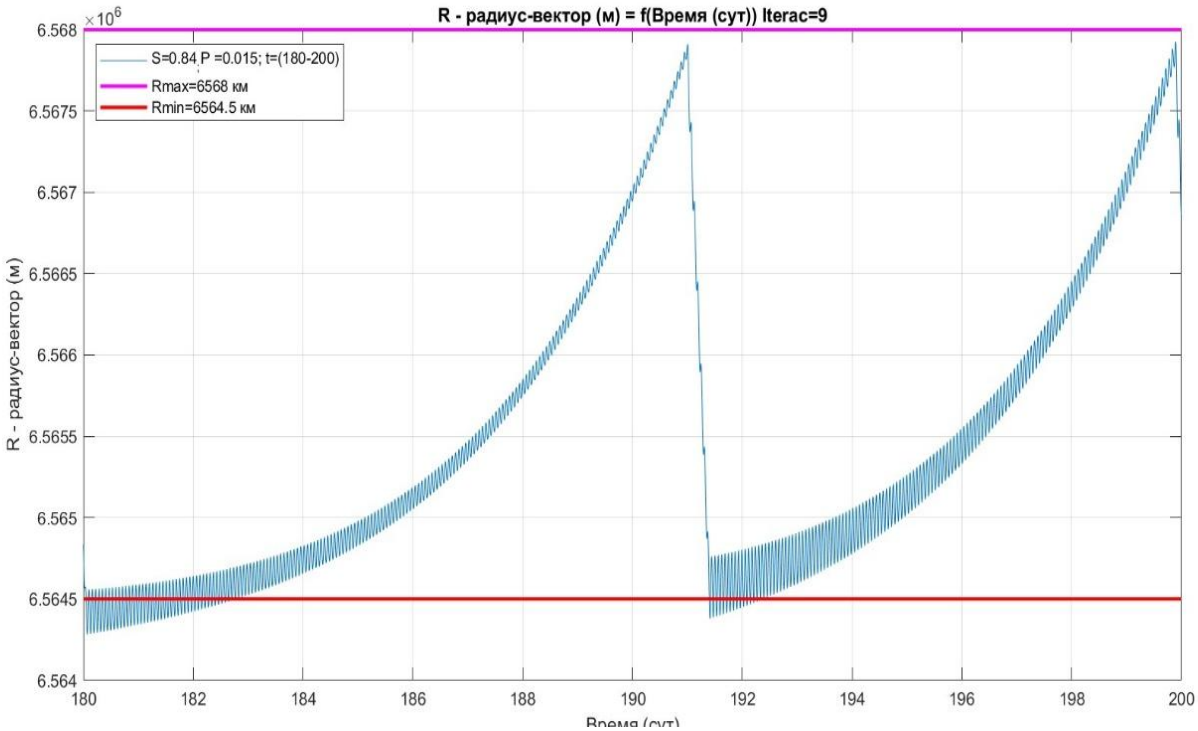


Рис. 10. Движение КА в трубке R = [6564.5, 6568] км (итерация 9)

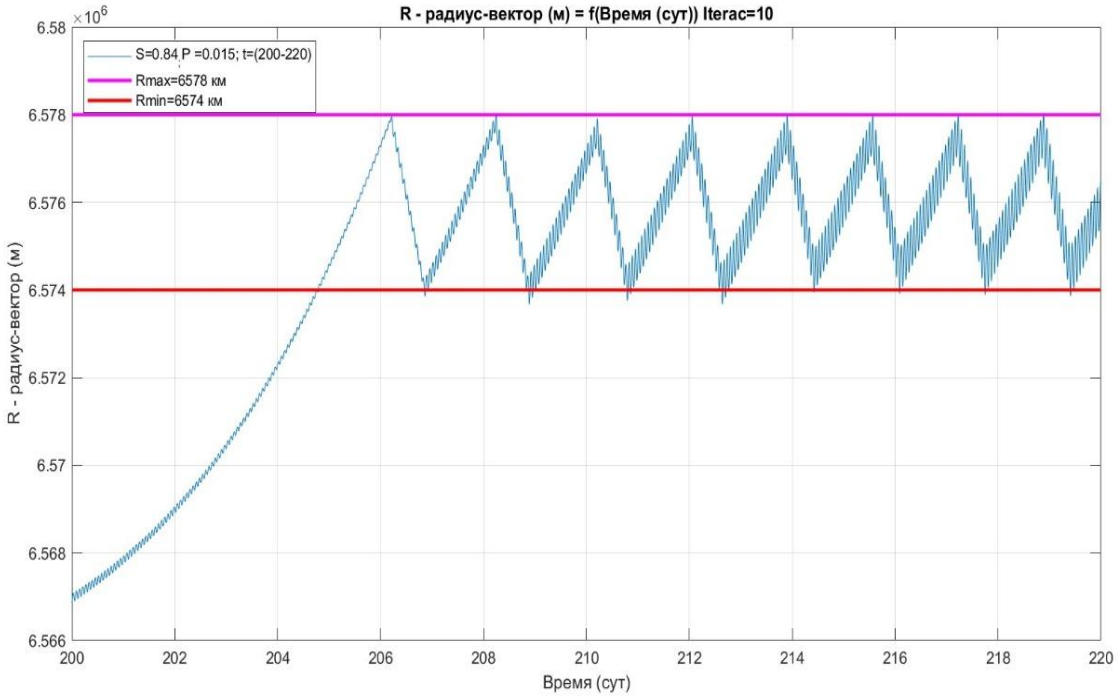


Рис. 11. Движение КА в трубке R = [6574, 6578] км (итерация 10)

Результаты моделирования, представленные на рис. 1–11, отражают процессы маневрирования НМКА с периодическими повышением и снижением орбиты и удержания НМКА в заданных орбитальных трубках. Условия и результаты численных экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Условия и результаты численных экспериментов

Номер рисунка	Временной интервал (сут)	Результат моделирования движения низкоорбитального МКА
1, 2	1–40	Движение в заданном диапазоне высот (R = 6566÷6576 км) и удержание в 10-километровой орбитальной трубке
3	40–60	Снижение верхней границы до R = 6572 км и удержание внутри 8-километрового диапазона высот (R = 6566÷6572 км)
4	60–80	Переход на более высокую орбиту и удержание внутри орбитальной трубки (R = 6576÷6586 км)
5	80–100	Снижение орбиты до высоты R = 6566 км и дальнейшее удержание в орбитальной трубке (R = 6566÷6572 км)
6	100–120	Повышение нижней границы до R = 6568 км и удержание в орбитальной трубке (R = 6568÷6572 км)
7	120–140	Снижение нижней и верхней границ и удержание в орбитальной трубке (R =6565÷6570 км)
8	140–160	Снижение верхней границы и удержание в орбитальной трубке (R = = 6565÷6568 км)
9	160–180	Снижение нижней границы и повышение верхней и удержание в орбитальной трубке (R = 6564,5÷6570 км)
10	180–200	Снижение верхней границы и удержание в орбитальной трубке (R = = 6564.5÷6568 км)
11	200–220	Переход на более высокую орбиту и удержание в орбитальной трубке (R = 6574÷6578 км)

Расчеты нижней границы коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника, удовлетворяющей всем участкам численного эксперимента, получены для различных значений коэффициента использования рабочего тела двигателя.

Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчеты нижней границы коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника для различных значений коэффициента использования рабочего тела двигателя

№ п/п	Коэффициент использования рабочего тела двигателя	Нижняя граница коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборника
1	0,5	0,86
2	0,6	0,71
3	0,7	0,61
4	0,8	0,54
5	0,9	0,52

Таким образом, полученные результаты позволяют обосновать требования к характеристикам воздухозаборника в составе ДУ МКА, функционирующих на сверхнизких орбитах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численных экспериментов показали возможность перехода МКА, оснащенного ДУ с воздухозаборником, на новые орбиты и ее удержания в заданном диапазоне высот при реализации простейшего закона управления.

Результаты моделирования позволяют предъявить требования к нижней границе коэффициента накопления рабочего тела воздухозаборником, которая обеспечивает управление движением МКА на протяжении всего периода моделирования. В представленной постановке результаты получены впервые.

Задачи разработки и применения сверхнизкоорбитальных МКА, оснащенных ДУ с воздухозаборником, обусловливают необходимость дальнейших научных исследований в части обоснования технического облика устройств для забора остаточной атмосферы, а также границ их применимости.

Список использованных источников

1. Оптимальные переходы с малой тягой между близкими околокруговыми компланарными орбитами / А. А. Баранов [и др.] // Космические исследования. – 2011. – Т. 49, № 3. – С. 278–288.

2. *Юрин В. В.* Оптимальная коррекция параметров орбиты космических аппаратов с двигателем малой тяги // Космические исследования. – 1983. – Т. XXI, № 5. – С. 666–674.

3. *Колосов Г. Е., Ван Лицзе* Коррекция параметров полета с двигателями малой тяги // Полет : общеросс. научно-техн. журн. – 2012. – № 11. – С. 27–36.

4. *Салмин В. В., Волоцуев В. В., Шиханов С. В.* Поддержание заданных орбитальных параметров космического аппарата с помощью двигателей малой тяги // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 4(42). – С. 248–254.

5. *Ишков А. С.* Анализ эффективности применения электрореактивных двигателей для задач поддержания околокруговых орбит // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 55–63.

6. *Салмин В. В.* Метод отыскания приближенно-оптимального управления космическими аппаратами с двигателями малой тяги // Космические исследования. – 1968. – Т. VI, вып. 5. – С. 684–692.

7. Концепция применения технологий унифицированных космических платформ на основе открытой архитектуры в процессах создания и эксплуатации перспективных космических аппаратов / А. А. Абдурахимов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 683. – С. 84–90.

8. *Скворцов Д. В.* Подход к моделированию функционирования космических аппаратов в условиях воздействия факторов космического пространства с использованием искусственных нейронных сетей // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 45–57.

9. *Тимохович А. С., Савык А. Я.* Ионные двигатели // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т. 1. – С. 506–508.

10. *Горшков О. А., Муравлев В. А., Шагайда А. А.* Холовские и ионные двигатели для космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 2008. – 280 с.

11. *Провоторов П. В.* Исследование работы ионного двигателя и создание его действующей модели. – М. : МФТИ, 2019. – 8 с.

12. Основные результаты разработок центра Келдыша в области ЭРДУ / А. С. Ловцов [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2020. – № 2. – С. 3–15.

13. Математическая модель движения сверхнизкоорбитального космического аппарата с электрическим ракетным двигателем / А. В. Аксёнов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2025. – Вып. 697. – С. 198–206.

14. *Гродзовский Г. Л., Иванов Ю. Н., Токарев В. В.* Механика космического полета с малой тягой. – М. : Наука, 1966. – 680 с.

15. *Гродзовский Г. Л., Иванов Ю. Н., Токарев В. В.* Механика космического полета. Проблемы оптимизации. – М. : Наука, 1975. – 704 с.

16. *Салмин В. В*. Оптимизация космических перелетов с малой тягой : Проблемы совместного управления траекторным и угловым движением. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.

17. *Шумилкин В. Г.* Управление тягой орбитального аппарата с двигателем ограниченной мощности при полете с накоплением атмосферного воздуха // Ученые записки ЦАГИ. – 1976. – Т. VII, № 2. – С. 81–87.

18. *Власов С. А., Мамон П. А*. Теория полета космических аппаратов. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 435 с.

19. ГОСТ 4401-81. Стандартная атмосфера. Параметры. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 181 с.

20. *Скворцов Д. В., Краснощёков С. Н., Вилисов Д. В.* Программный комплекс имитационного моделирования орбитальных космических аппаратов нано-класса // Сборник алгоритмов и программ прикладных задач. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – Вып. 34. – С. 13–21.

21. Астрономический ежегодник на 2015 год. – СПб. : ИПА РАН, 2014. – 683 с.

22. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) : спец. справочник. – М. : ФГБУ 27 ЦНИИ МО РФ, 2020. – 64 с.

Л. А. Иноземцева;
Н. С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЕННО-ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ КАК АКСИОЛОГИЧЕСКИЙ ИМПЕРАТИВ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ

В статье рассматривается актуальность формирования военно-профессиональных компетенций у педагогических работников в контексте современных социально-политических и образовательных вызовов как аксиологический императив в подготовке педагогических работников в ходе освоения дополнительных профессиональных программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации.

Ключевые слова: компетентностный подход, аксиологический императив, военно-профессиональные компетенции, педагогические работники, дополнительное профессиональное образование, образовательные технологии.

Современная образовательная парадигма, сформировавшаяся в условиях динамичных социокультурных, технологических и геополитических трансформаций, а также усложнения характера военных угроз предъявляет новые повышенные требования к профессиональной подготовке военных кадров. Для обеспечения высокого уровня подготовки военных специалистов особое значение приобретает наличие квалифицированного преподавательского состава, обладающего современными знаниями и способного реализовывать образовательные программы в условиях современных вызовов и постоянно меняющихся требований в сфере обороны государства.

Система дополнительного профессионального образования, являясь наиболее гибкой областью, чутко реагирующей на вызовы динамично меняющегося мира, призвана стать ключевым инструментом, формирующим у педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации комплекс военно-профессиональных компетенций и обеспечивающим постоянное обновление знаний, а также эффективность деятельности педагогических работников в соответствующей профессионально-ролевой позиции.

Подготовка востребованных специалистов сегодня требует переосмысления и обновления системы дополнительного профессионального образования. Ключевыми направлениями являются пересмотр образовательных целей, актуализация учебных программ, внедрение практико-ориентированных методов обучения, направленных на развитие комплексных компетенций через интеграцию теории с реальными задачами, фундаментальности с практической направленностью подготовки.

Непрерывное совершенствование преподавательского состава и актуализация его компетенций возможны только при переходе к принципиально иной модели дополнительного профессионального образования, требующей максимальной гибкости и отзывчивости на быстрые изменения профессионально-образовательного ландшафта. Новый социальный заказ в системе образования требует подготовки специалиста, обладающего инновационной восприимчивостью, практико-ориентированным мышлением, готовностью выполнять новые, междисциплинарные задачи в условиях быстрых технологических сдвигов, внутренней мотивированностью к непрерывному профессиональному развитию.

В этих условиях формирование военно-профессиональных компетенций становится не просто одним из требований, а стержневой ценностью, вокруг которой выстраивается вся

архитектура дополнительных профессиональных программ. Построенная на таком ценностном фундаменте, она перестает быть сугубо инструментальным механизмом обновления знаний. Она становится стратегическим инструментом развития кадрового потенциала системы военного образования, превращаясь в сложную аксиологическую проблему. Ее ядро составляет вопрос о базовых ценностях и ориентациях профессионального роста преподавателя. Ценность дополнительного профессионального образования, таким образом, определяется не столько объемом транслируемой информации, сколько его способностью формировать ценностное отношение преподавателя к своей деятельности, к профессии в целом и к самому себе, что, в свою очередь, актуализирует проблему ценностного выбора при проектировании дополнительных профессиональных программ.

Наиболее полно этот аксиологический выбор отражается в сочетании двух полярных подходов к определению содержания дополнительных профессиональных программ. С одной стороны, прагматически-утилитарный подход фокусируется на передаче строго необходимого минимума знаний и умений, напрямую применяемых в текущей педагогической практике, и определяет «профессию» как формализованную совокупность функций преподавателя. С другой стороны, широкий культурно-профессиональный подход нацелен на расширение профессионального кругозора педагога, включение знаний, которые заведомо могут не иметь сиюминутного практического приложения, но формируют общую культуру, критическое мышление и педагогическое мировоззрение, апеллируя к его «призванию» как к внутренней ценностной основе, выходящей за рамки должностных инструкций. Данные ориентации непосредственно реализуются в требованиях к содержанию образования, призванному сформировать определенный образ педагогической профессии.

Выступая сторонниками культурно-профессионального подхода, авторы выделяют три группы аксиологически значимых компонентов, подлежащих формированию у педагогических работников: ценностно-смысловые (желания, стремления, идеалы), мотивационные (интересы, внутренние побуждения) и операциональные (умения и способности достигать цели). Ключевым аксиологическим феноменом в подготовке профессорско-преподавательского состава становится формирование профессионально-педагогической этики. Такие категории, как педагогический такт, авторитет, ответственность и долг, представляют собой высший уровень ценностной интеграции, аксиологический императив, где утилитарное умение решать педагогические задачи неразрывно сливается с нравственными принципами и личностной позицией преподавателя.

Данный императив проецируется и на аксиологические аспекты организации и ведения дополнительного профессионального образования, где сталкиваются принципы директивности – жесткого внешнего заказа на формирование конкретных компетенций – и элективности, предполагающей предоставление обучающимся возможности самостоятельно выбирать траектории и содержания образовательной деятельности. Это порождает устойчивое диалектическое противоречие между унифицированными требованиями к результату и индивидуальными ценностными запросами педагога на саморазвитие.

По нашему мнению, это противоречие разрешается интеграцией вышеперечисленных принципов, реализуемых в контексте компетентностного подхода. Он позволяет ориентировать систему дополнительного профессионального образования на целостное формирование педагогического работника, трансформируя нравственные ценности, широкие знания и умения обучающихся в формат военно-профессиональных компетенций, сочетающих операциональное мастерство (умение) с ценностно-мотивационным основанием (готовность и осознанная необходимость).

Следует отметить, что проблема компетентностного подхода является предметом активного научного интереса, изучению которого посвящены многочисленные исследования. Педагогическая наука предлагает широкий спектр определений компетентности – от обобщенных, системных концепций до узких трактовок, фокусирующихся на синтезе специальных знаний, практических умений и личностных качеств [2, 3, 6].

Сущность военно-профессиональной компетентности раскрывается через единство двух взаимосвязанных аспектов: деятельностного, отражающего уровень подготовленности военного специалиста (систему усвоенных знаний и практических умений), и личностного, проявляющегося в направленности на военно-профессиональную деятельность (комплексе свойств, мотивов, профессионально важных для педагога качеств и его ценностных ориентаций) [5].

Анализ научно-педагогической литературы, раскрывающей понятия «компетентностный подход», «компетентность», «компетенции», позволяет нам конкретизировать понятие «военно-профессиональные компетенции» как интегральную систему профессионально-личностных характеристик, формирующихся в ходе образовательного процесса военно-учебного заведения. Данная система обеспечивает готовность к эффективной служебной деятельности на основе усвоенных знаний и практических навыков в соответствии с нормативно установленными квалификационными требованиями к профессиональной подготовке [1, 4].

Военно-профессиональные компетенции педагогических работников в деятельности образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации являются комплексом элементов, обеспечивающих готовность слушателей профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников к профессионально-педагогической деятельности в условиях военной службы. Ключевым аспектом этой готовности выступает способность к творческой адаптации теоретического багажа и практического опыта для преодоления опыта проблемных ситуаций в образовательной и служебной деятельности.

К числу базовых элементов военно-профессиональных компетенций мы относим информационные, коммуникативные, инструментальные (технологические) и социальные.

Информационные элементы предполагают способность слушателей эффективно работать с информацией, умение быстро находить релевантные данные в различных источниках (бумажных и электронных), критически оценивая их достоверность и значимость, обрабатывать большие массивы информации, использовать электронные образовательные ресурсы и средства современных информационно-коммуникационных технологий как инструментарий для анализа, проектирования и реализации профессиональных решений.

Коммуникативные элементы выражаются в способности использовать нормы и техники эффективного общения: распознавать ключевые смыслы и эмоциональные оттенки собеседника, адаптировать стиль общения под разные аудитории, излагать свою точку зрения, владея различными коммуникативными стратегиями, достигать поставленных образовательных и служебных задач через управляемое вербальное и невербальное взаимодействие в условиях строгой субординации.

Инструментальные элементы включают в себя готовность и способность решать исследовательские и инновационные задачи в сфере образования, конструировать образовательный процесс, разрабатывать и реализовывать образовательные программы, диагностические оценочные педагогические методы, формы и технологии обучения, обобщать педагогический опыт, систематизировать и распространять учебно-методические материалы, заниматься самообразованием.

Социальные элементы заключаются в психологической готовности преподавательского состава к эффективному взаимодействию, в готовности и способности понимать социально-психологические процессы в коллективе, взаимодействовать с другими участниками образовательного процесса, в умении строить доверительные отношения, мотивировать обучающихся, распределять задачи и нести ответственность за коллективный результат, действовать с учетом социально-культурного контекста и в строгом правовом поле.

Формирование военно-профессиональных компетенций педагогических работников является неотъемлемой частью ценностных ориентиров педагогической деятельности, способствуя их профессиональному и личностному росту, поэтому необходимо интегрировать их в систему дополнительного профессионального образования педагогических работников как

стратегический и ценностный приоритет, способный формировать компетентного специалиста.

Требования к дополнительным профессиональным программам для подготовки будущих военных преподавателей сводятся к созданию интенсивной имитационной среды профессиональной деятельности. Программы должны погружать слушателя в моделируемую профессиональную деятельность преподавателя. Таким образом, ценность дополнительных профессиональных программ смещается с передачи слушателям новых сведений к проживанию и освоению новых профессиональных позиций.

Эффективность реализации данного императива достигается при условии системного подхода, междисциплинарного взаимодействия и постоянной актуализации содержания программ в соответствии с современными требованиями и вызовами.

Качество и результативность процесса формирования военно-профессиональных компетенций детерминированы степенью реализации и гармоничным сочетанием базовых принципов, регулирующих организационные, методические и психолого-педагогические аспекты образовательной деятельности:

– единства военного, методического и психолого-педагогического начал целостного образовательного процесса, обеспечивающего синтез актуального военно-специального знания и современных технологий обучения, формирование целостного, системного мировоззрения, а также творческую адаптацию усвоенных знаний к новым профессиональным и жизненным ситуациям;

– практико-ориентированной направленности обучения, моделирующего профессиональную среду будущей педагогической деятельности посредством проектирования педагогических ситуаций и решения педагогических задач, проектной деятельности;

– преемственности и непрерывности профессионального роста, обеспечивающего содержательную связь этапов обучения слушателей и последующее сопровождение их в новой роли;

– персонификации обучения как ориентации образовательного процесса на результаты, обеспечивающие личностное развитие обучающихся; как личностно-ориентированный процесс, направленный на раскрытие индивидуальных резервов и приумножение интеллектуального капитала обучающихся через построение индивидуального образовательного маршрута и предоставление свободы выбора инструментов для достижения личностно значимых целей.

Внедрение перечисленных принципов в педагогическую практику, по мнению авторов, гарантирует целостный характер развития военно-профессиональных компетенций, направленных на достижение главной цели – всестороннее становление педагога как личности и профессионала.

Методологическую основу формирования военно-профессиональных компетенций составляют современные педагогические технологии, интегрирующие активные и интерактивные методы обучения: проблемное обучение, метод проектов, игровые методы, кейс-стади. Их использование позволяет формировать не только теоретические знания и практические навыки, необходимые для реализации большого репертуара педагогических задач, но и ценностные установки слушателей.

На кафедре академии в процессе формирования военно-профессиональных компетенций слушателей широкое распространение получили различные образовательные технологии.

Проблемное обучение является одним из ведущих методов, применяемых сегодня на учебных занятиях. Посредством специально смоделированных проблемных ситуаций и задач, погружающих слушателей в своего рода «профессиональную историю», происходит проживание и осмысление основных профессиональных граней деятельности педагога.

Принцип проблемности воплощается в двух основных плоскостях: содержательная сторона достигается путем введения в образовательный процесс системы учебных проблем, моделирующих реальные противоречия актуального научного знания и профессиональной прак-

тики; процессуальная сторона реализуется через организацию обучения в диалогическом формате, где обучающиеся проявляют личностную, интеллектуальную и социальную активность и инициативу, заинтересованы в суждениях друг друга, дискутируют и в ходе коллективного обсуждения разрешают учебную проблему.

Формирование военно-профессиональных компетенций обеспечивается реализацией практико-ориентированной направленности обучения и выполнением задач профессионального содержания в ходе деловых и ролевых игр, дискуссий, технологии case-study, применяемых профессорско-преподавательским составом кафедры и позволяющих моделировать будущую профессиональную среду.

В ходе проектной деятельности обучающиеся проявляют высокую познавательную активность, творчество и самостоятельность, что формирует у них способность получать новый образовательный продукт, представляющий для них учебную, социальную и профессиональную ценность.

Формирование военно-профессиональных компетенций сегодня во многом зависит от интеграции цифровых инструментов в учебный процесс. Обладая серьезным преимуществом – возможностью выстраивать индивидуальные образовательные маршруты – цифровые образовательные ресурсы и технологии существенно расширяют методический арсенал системы дополнительного профессионального образования, поскольку позволяют моделировать сложные профессиональные ситуации, визуализировать динамические процессы, корректировать учебный процесс и измерять рост конкретных компетенций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, формирование военно-профессиональных компетенций у слушателей в процессе обучения по дополнительным профессиональным программам профессиональной подготовки и повышения квалификации педагогических работников представляет собой целенаправленный процесс целостного развития, в ходе которого происходит трансформация и наращивание их профессионального потенциала. Результатом освоения этих программ, выступающих наиболее гибкой и неотъемлемой составляющей стратегической задачи по подготовке высококвалифицированного профессорско-преподавательского состава, должен стать педагог, способный не только транслировать военные знания, но и моделировать соответствующую профессиональную среду, выступать для обучающихся носителем ценностей долга, дисциплины и профессионализма в сфере педагогической деятельности.

Список использованных источников

1. *Батюшкин С. А.* Основы подготовки преподавателя высшей школы военного профиля. – М. : КНОРУС, 2024. – 470 с.

2. *Вербицкий А. А.* Контекстное образование в системе дополнительного образования педагога // Нижегородское образование. – 2012. – № 1. – С. 36–42.

3. *Гуцу Е. Г., Смирнова Е. И.* Мотивационно-ценностный компонент в структуре профессиональной компетенции преподавателя вуза: критерии и уровни развития // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=23101 (дата обращения: 20.01.2026).

4. *Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С.* Психолого-педагогические императивы формирования профессиональной компетентности преподавателя военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 388–393.

5. *Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С.* Акмеологические инварианты в структуре профессиональной компетентности преподавателя военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 684. – С. 274–278.

6. *Печеркина А. А., Сыманюк Э. Э., Умникова Е. Л.* Развитие профессиональной компетентности педагога: теория и практика : моногр. – Екатеринбург : Урал. гос. пед. ун-т, 2011. – 233 с.

С. М. Молдованова,
кандидат военных наук, доцент;
С. А. Мусиенко,
кандидат военных наук, доцент

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ФУНДАМЕНТАЛИЗАЦИИ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ВОЕННО-УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ

Современная подготовка военных инженеров сталкивается с необходимостью сочетать глубокое освоение фундаментальных знаний и приобретение конкретных профессиональных компетенций. В статье рассматриваются теоретико-методологические основания, раскрывающие общие связи и принципиальные отличия двух подходов к построению инженерного образования, выделяются преимущества и недостатки каждого подхода, рассматриваются наиболее эффективные методические приемы и формы организации учебного процесса, позволяющие успешно синтезировать рассматриваемые подходы при подготовке военных инженеров. Проанализированы основные проблемы, препятствующие достижению гармонии между фундаментальным знанием и профессионализацией военных специалистов, выявлены объективные и субъективные факторы, обусловливающие возникновение противоречий.

Ключевые слова: фундаментализация, профессиональная направленность, инженерное образование, компетенция, инновационность, интеграция.

Современная военно-техническая политика государства требует наличия квалифицированных военных специалистов, обладающих глубокими знаниями и умениями в области эксплуатации сложных технических систем военного назначения. Обучение военных инженеров направлено на обеспечение высокого уровня компетентности в областях, связанных не только с эксплуатацией, обслуживанием и модернизацией боевых машин, оружия и специальных устройств, но и с руководством и управлением личным составом, воинским коллективом.

Специфика современного этапа научно-технической революции, опыт ведения специальной военной операции и участия в локальных конфликтах существенно изменили облик современной армии, характер боевых действий. Военная техника стремительно усложняется, возрастает роль высокотехнологичных вооружений и военной инфраструктуры. Активное внедрение кибернетики, роботизации, искусственного интеллекта и других инновационных технологий ставит качественно новые задачи перед системой высшего образования, особенно остро проявляющиеся в сфере подготовки военных инженеров. Важнейшей задачей национальной безопасности государства становится возрождение отечественного инженерного образования, целью которого является подготовка кадров, способных не только эксплуатировать сложную военную технику, обладающую высоким уровнем автоматизации и автономии, эффективно ее проектировать, разрабатывать, совершенствовать, но и непосредственно самим уметь быстро адаптироваться к изменениям технического оснащения войск. Выпускники высших военных учебных заведений должны обладать глубокими теоретическими познаниями в области физики, математики, информатики, химии и других дисциплин, составляющих основу технических наук. Это обеспечит конкурентоспособность выпускаемых специалистов и позволит своевременно внедрять инновационные решения в войска.

В связи с вышесказанным подготовка военных специалистов требует органичного объединения фундаментальных знаний и профессионально ориентированных навыков. Несмотря на значительное количество работ, посвященных этому вопросу [1–3], остается актуальной задача выявления путей гармонизации и достижения полноценной интеграции теории и практики. Только такое сочетание позволяет обеспечить высокий уровень готовности вы-

пускников к решению сложных профессиональных задач, стоящих перед современными Вооруженными Силами Российской Федерации.

Авторы считают, что проблема единства фундаментальной составляющей и профессионально ориентированного компонента образовательной программы является ключевой для системы инженерного образования Вооруженных Сил Российской Федерации. Решение этой проблемы обеспечивает подготовку квалифицированных кадров, способных успешно решать задачи обороны и безопасности страны в условиях быстрых технологических преобразований.

Фундаментализация образования представляет собой процесс формирования глубоких теоретических основ, обеспечивающих прочную базу научных знаний, необходимых военным инженерам для эффективного решения сложных технических и инженерных задач в условиях, в которых находятся современные Вооруженные Силы Российской Федерации.

Введение термина «фундаментализация» связано с рядом объективных факторов, обусловленных изменениями в характере вооруженной борьбы, развитием новых технологий и требований к профессиональной компетентности военнослужащих инженерного профиля.

Опыт подготовки военных инженеров в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, где особое внимание уделяется формированию и совершенствованию базовых знаний физики, химии, математики и информатики, целесообразно сохранить и использовать в современных условиях, так как их понимание позволяет эффективно проектировать и эксплуатировать современную боевую технику.

К основным факторам, обосновывающим введение понятия «фундаментализация», по мнению авторов, могут быть отнесены: интеграция междисциплинарных подходов, повышение уровня инновационности, обеспечение длительного успешного функционирования на вышестоящих должностях без дополнительного образования и необходимость понимания общих закономерностей функционирования сложных военно-технических систем.

Современные военные инженеры сталкиваются с необходимостью совершенствования профессиональных компетенций, которое невозможно без интеграции полученных фундаментальных знаний базовых дисциплин. Глубокая фундаментальная подготовка обеспечивает способность к самообучению и освоению новейших достижений науки и техники, способствует развитию творческого потенциала будущих военных инженеров, позволяя создавать уникальные технические решения.

Фундаментализация подготовки предполагает значительное увеличение объема изучаемых теоретических предметов, включая физику, химию, высшую математику, информатику, вычислительную технику, философию и историю; систематизацию и интеграцию фундаментальных знаний, формирующихся в результате освоения широкого спектра гуманитарных, социальных и естественных наук.

Формирование фундаментальных знаний у обучающихся направлено на формирование обширного набора компетенций и знаний, охватывающих как базовые научные дисциплины, так и специализированные области военного дела. На наш взгляд, в качестве ключевых направлений можно выделить следующие:

1. Физико-математические знания, включающие изучение высшей математики, механики, электродинамики, квантовой физики и термодинамики. Эти знания обеспечивают понимание физических процессов, происходящих в боевых системах, способствуют разработке моделей и расчетов надежности оборудования. Основное предназначение физико-математической подготовки в военном инженерном вузе – подготовить курсанта к качественному изучению дисциплин профессионального цикла.

2. Знания информационных технологий и кибербезопасности являются неотъемлемой частью современной подготовки инженера. Компетенции, сформированные посредством обучения работе с компьютерными системами, сетевыми технологиями, методами защиты информации и анализа больших объемов данных, необходимы для проектирования и эксплуатации автоматизированных комплексов управления войсками и оружием.

3. Знания материаловедения и конструкционной прочности, полученные в ходе изучения свойств металлов, композитов и полимеров, методов оценки прочности конструкций позволят оптимизировать конструкцию боевой техники, повысить ее надежность и долговечность.

4. Знания электроники и электротехники сформируют основу для создания и обслуживания электронных компонентов военной техники, систем связи и навигации.

5. Знания безопасности жизнедеятельности и экологии позволят инженерам учитывать экологические последствия своей деятельности, а также минимизировать негативное воздействие производства и эксплуатации оружия на окружающую среду.

6. Психолого-педагогические знания, которые служат основой для формирования коммуникативных способностей, навыков командного взаимодействия, психологической устойчивости и стрессоустойчивости, являются важным условием для успешного взаимодействия в коллективе, принятия решений в экстремальных ситуациях.

Фундаментализация образования позволяет сделать акцент на глубоком изучении теоретических основ наук, предоставлении обширных знаний, выходящих далеко за пределы узкой специализации.

Профессиональная направленность, напротив, акцентирует внимание на практических аспектах подготовки высококвалифицированных военных инженеров. Она направлена на формирование конкретных профессиональных компетенций, востребованных заказчиками подготовки в различных направлениях военной деятельности. Профессиональная направленность предполагает ориентацию образовательного процесса на запросы современных Вооруженных Сил Российской Федерации, интеграцию академического знания с практическими требованиями заказчиков подготовки и активное участие предприятий оборонно-промышленного комплекса, научно-исследовательских организаций в разработке образовательных стандартов и учебных планов.

Главная цель профессиональной направленности – предоставление знаний и умений, необходимых для продуктивного начала профессиональной деятельности сразу после окончания обучения.

Особенностью профессиональной направленности является акцент на строго целевых, прикладных знаниях и умениях, необходимых для выполнения должностных обязанностей. Основной задачей здесь является передача обучающимся четкого набора навыков, непосредственно используемых в повседневной служебной деятельности.

Если фундаментализация ставит целью развитие широкого круга компетенций, основанных на понимании общих законов и закономерностей, теоретических знаний и способностей критически осмысливать различные концепции и теории, то профессиональная направленность, напротив, стремится развить набор узкоориентированных профессиональных навыков, пригодных для адаптации к требованиям конкретной профессии, воинской должности.

На наш взгляд, основные отличия фундаментализации от профессиональной направленности можно рассматривать, исходя из содержания образовательных программ, различий в методологии обучения и оценочных критериев качества подготовки.

Образовательные программы, построенные на принципе фундаментализации, характеризуются наличием большого количества теоретических дисциплин общего профиля, посвященных основам наук. Программа профессиональной направленности концентрируется на прикладных курсах, специально предназначенных для быстрого введения в профессиональную деятельность.

Процесс обучения в рамках фундаментализации строится вокруг лекционных курсов, семинаров и лабораторных занятий, направленных на освоение основных принципов и законов изучаемых дисциплин, на стимулирование творческой мысли и независимости мнений. Профессиональная направленность включает большое количество практикумов, стажировок, мастер-классов и иных форм активного освоения производственных процессов и инструментов, а также тренинги, упражнения и демонстрацию техник и приемов выполнения задач.

Оценки успеваемости обучающихся в рамках фундаментального образования преимущественно основаны на глубине понимания материала, качестве аналитической обработки полученной информации и уровне владения методами научных исследований. Оценивание качества подготовки военных кадров больше ориентировано на степень овладения техническими навыками, успешность прохождения практики и демонстрацию готовности выполнять профессиональные обязанности.

Выпускники, получившие фундаментальное образование, лучше подготовлены к дальнейшей научной деятельности, переобучению и изменению специализации. Те, кто прошел профессионально ориентированную программу, скорее получают преимущества в виде быстрой интеграции в рабочий процесс и быстрого старта карьеры. Тем не менее в случае смены направления военной службы им потребуется пройти дополнительную профессиональную программу профессиональной переподготовки для освоения нового вида деятельности.

Практика показывает, что специалист с фундаментальным образованием демонстрирует более высокую профессиональную адаптивность и успешнее осуществляет переходы между различными областями деятельности, что, по мнению авторов, отличает его от специалиста с узкой профессиональной подготовкой.

Несмотря на очевидные различия, фундаментализация и профессиональная направленность тесно связаны друг с другом и взаимодополняют друг друга: обеспечивают гибкость и адаптивность выпускников; формируют междисциплинарные компетенции; стимулируют (поддерживают) научно-исследовательскую деятельность обучающихся и т. п.

Обучающиеся, прошедшие качественную фундаментальную подготовку, обладают способностью быстро усваивать новую информацию и применять полученные знания в нестандартных ситуациях. Это делает их особенно ценными сотрудниками в условиях динамично меняющегося мира науки и технологий. Однако глубокое понимание основ наук само по себе недостаточно для успешной профессиональной реализации. Важно также обладать специфическими профессиональными умениями и опытом практической работы, которые приобретаются именно благодаря профессионально ориентированной подготовке.

В современных условиях военному инженеру зачастую приходится работать на стыке нескольких дисциплин, взаимодействовать с коллегами разных профилей и активно интегрироваться в междисциплинарные проекты. Глубокая фундаментальная база помогает развивать способность мыслить комплексно, видеть проблемы целостно и находить оптимальные решения, объединяя подходы различных научных направлений. В свою очередь, прикладная подготовка позволяет освоить конкретные инструменты и методы, необходимые для эффективной интеграции в коллективную работу над сложными проектами.

Взаимосвязь между фундаментализацией и профессиональной направленностью, по мнению авторов, проявляется в том, что глубокое владение фундаментальными знаниями служит основой для быстрого и качественного освоения профессиональных навыков, расширения возможностей дальнейшего профессионального роста и карьерного продвижения. Именно фундаментализация создает прочный научный базис, позволяющий будущим специалистам уверенно решать широкий спектр профессиональных задач, успешно адаптируясь к изменениям в сфере оборонной промышленности и военном деле.

Обеспечение единства фундаментализации и профессиональной направленности является одной из наиболее сложных задач современной системы высшего образования. Несмотря на наличие многочисленных концептуальных разработок и методик, реализующих данную идею, существует целый ряд проблем, препятствующих достижению оптимального баланса между двумя этими аспектами образовательной деятельности.

Проведенный авторами анализ квалификационных требований к военно-профессиональной подготовке выпускников показал, что в настоящее время приоритетными становятся компетенции, обеспечивающие готовность специалиста к самостоятельной рабо-

те, решению сложных творческих задач, применению полученных знаний в новых областях и созданию уникальных решений.

Однако достичь подобного уровня невозможно исключительно путем глубокой фундаментализации или радикальной профессионализации учебного процесса. Необходим баланс между этими компонентами, позволяющий формировать конкурентоспособных профессионалов нового типа, свободно владеющих базовыми дисциплинами и одновременно уверенно применяющих современные технические средства и передовые производственные технологии.

Проблема рационального объединения двух составляющих, как считают авторы, обусловлена рядом факторов, связанных как с объективными особенностями образовательного процесса, так и с субъективными обстоятельствами. К числу основных можно отнести [4–6]:

– дефицит времени, выраженный нехваткой часов аудиторной нагрузки для полного усвоения обучающимися необходимого объема знаний и приобретения достаточного опыта практической деятельности, возникающей за счет перегруженности учебных планов большим количеством предметов (модулей), не всегда имеющих непосредственное отношение к будущей профессиональной деятельности выпускника;

– низкую мотивацию педагогов вузов к тому, чтобы уделять больше внимания формированию профессиональных навыков и внедрению активных методов обучения, стимулирующих творческое мышление и практические умения обучающихся;

– отсутствие согласованности и постоянного взаимодействия высших военных учебных заведений с воинскими частями, предприятиями промышленности и научно-исследовательскими организациями, которое позволило бы не только обучающимся, но и научно-педагогическим работникам познакомиться с последними достижениями науки и техники, особенностями эксплуатации вооружения и в последующем применять полученные знания на практике;

– недостаточность финансовых ресурсов, которая ограничивает возможности модернизации материально-технической базы военных образовательных организаций, закупку новейшего оборудования и внедрение инновационных педагогических технологий, обеспечивающих необходимое качество учебно-воспитательного процесса.

Причины появления таких проблем многообразны и, по мнению авторов, коренятся в исторических традициях, сложившейся практике подготовки военных кадров, нехватке ресурсного обеспечения и т. п.

Современные военные учебные заведения сталкиваются с рядом проблем, препятствующих гармоничному сочетанию фундаментальности и профессиональной направленности. В качестве основных авторы рассматривают: преобладание одного подхода над другим, что ведет либо к излишнему теоретизированию, либо к поверхностному знанию фундаментальных основ; отсутствие преемственности между общей и специальной подготовкой, ведущее к разобщенности в восприятии знаний и замедленному профессиональному становлению; недостаточное взаимодействие кафедр и факультетов, занимающихся фундаментальной и профессиональной подготовкой; сложности в определении оптимальной пропорции теоретических и практических занятий.

Обобщив результаты исследований, направленных на устранение разрыва между фундаментальностью и профессиональной направленностью в военных инженерных вузах, а также на основе опыта подготовки военных кадров в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, авторы считают, что для успешного синтезирования двух подходов необходимо сформировать целевую установку на инновационное инженерное образование во всех видах образовательной, методической, научной деятельностях и воспитательной работы. Это означает, что наряду с формированием знаний, навыков, умений и компетенций значимой целью инженерного образования становится формирование научно-исследовательской, технической культуры, инженерного мышления [1–3, 5–7].

Мы считаем, что для реализации указанной цели в качестве наиболее эффективных методов работы в ходе организации и подготовки военных кадров можно рассматривать следующие [5–7]:

– обеспечение тесной связи теории и практики, установление наиболее актуальных в настоящее время теорий, способных объяснить современное состояние техники и технологий;

– восстановление производственной практики курсантов с выездом на предприятия военно-промышленного комплекса;

– восстановление стажировки преподавательского состава на предприятиях военно-промышленного комплекса на инженерных должностях;

– проведение эксплуатационной практики курсантов в воинских частях и на предприятиях;

– восстановление практики привлечения опытных инженеров военно-промышленного комплекса к проведению занятий с курсантами;

– создание современной учебно-материальной базы, которая позволит проводить занятия на реальных образцах вооружения, военной и специальной техники, сведя к минимуму «виртуальные» лабораторные работы и другие занятия в цифровой образовательной среде, несмотря на значительные финансовые затраты;

– существенное усиление фундаментальной и общепрофессиональной основы инженерного образования путем изучения обучающимися математических дисциплин, физики, информатики и информационных технологий в увеличенном объеме по всем специальностям подготовки (без дифференциаций), увеличения времени на изучение элементной (компонентной) базы с элементами производства, исключения «самодеятельности» – преподавание общепрофессиональных инженерных дисциплин только профессионально подготовленными преподавателями независимо от факультета и кафедры;

– активное внедрение проектно-организованных технологий обучения путем обоснования и включения в учебные программы нового вида учебного занятия – проектной работы, а также восстановление выполнения курсовых работ, ориентированных на инженерный анализ;

– совершенствование профориентационной работы с целью выявления курсантов с инженерным мышлением, развитие конструкторских бюро (межкафедральных, кафедральных и т. п.), поощрение создания и функционирования инженерных школ, кружков и т. п.

Каждый из предложенных методов подготовки военных инженеров имеет право на существование, поскольку решает разные задачи. Однако наилучших результатов можно достичь только тогда, когда эти методы будут дополнять друг друга. Авторы считают, что для подготовки специалистов, способных уверенно действовать в любых условиях оперативной обстановки, очень важно обеспечить баланс между глубокими теоретическими знаниями и необходимыми профессиональными навыками.

Дальнейшее развитие системы подготовки военных инженеров, основанное на интеграции достижений науки и практики, создании инновационных образовательных методик, будет способствовать формированию нового поколения профессионалов, готовых решать самые сложные задачи национальной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило авторам сделать вывод о необходимости комплексного подхода к обеспечению гармонии между фундаментальной и профессиональной подготовкой обучающихся. Для реализации поставленной задачи необходимы значительные усилия всего коллектива военного учебного заведения, согласованные действия руководства,

профессорско-преподавательского состава, заказчиков подготовки, интеграции военного образования и науки.

Предлагаемые авторами рекомендации направлены на улучшение качества подготовки военных специалистов, обладающих прочными теоретическими знаниями и высокими профессиональными навыками, способные эффективно решать боевые задачи и уверенно развиваться в своей военной специальности.

Список использованных источников

1. *Леонова Н. А.* Принцип фундаментализации в системе военного профессионального образования // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. – 2008. – № 84. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/printsip-fundamentalizatsii-v-sisteme-voennogo-professionalnogo-obrazovaniya (дата обращения: 14.09.2025).

2. *Костюков Д. И., Кетух Д. К.* Проблемы поэтапного формирования профессиональной направленности личности в условиях обучения в военном вузе // Повышение эффективности реализации фундаментальных научных исследований как условие долгосрочного устойчивого развития России : сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практ. конф. 28 июля 2020 г. – Белгород : ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2020. – С. 59–62. – URL: https://apni.ru/article/1043-problemi-poetapnogo-formirovaniya-profession (дата обращения: 14.09.2025).

3. *Арешин Д. Н.* Развитие учебного потенциала курсантов военного вуза при изучении дисциплин профессионального цикла: дис. … канд. пед. наук. – Омск, 2018. – 196 с.

4. *Белошицкий А. В., Дедик Н. А., Мещерякова Е. И.* Подготовка офицеров-преподавателей военных вузов в системе переподготовки и повышения квалификации: психолого-педагогическая проблематика // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 690. – С. 264–269.

5. *Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С.* Динамика системы познавательной мотивации в процессе становления преподавателя военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 262–266.

6. *Молдованова С. М., Николаев А. Ю.* Формирование компетенций офицерских кадров в современных условиях: инновационные технологии инженерной педагогики в военном образовании // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2025. – № 34. – С. 176–183.

7. *Молдованова С. М., Николаев А. Ю., Федорова Е. В.* Актуальные проблемы формирования научно-исследовательской культуры обучающихся в военной образовательной организации и пути решения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2024. – № 31. – С. 192–200.

П. Ю. Потяев,
кандидат педагогических наук
Дальневосточное гвардейское высшее общевойсковое командное ордена Жукова училище имени Маршала Советского Союза К. К. Рокоссовского, г. Благовещенск.

ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ПРОФИЛАКТИКА СИНДРОМА ПОЛЯРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ У ВОЕННОСЛУЖАЩИХ НА ОСНОВЕ ЭТНОКУЛЬТУРНЫХ ПРАКТИК КОРЕННЫХ НАРОДОВ АРКТИКИ

Статья посвящена преодолению ограничений традиционных подходов к профилактике синдрома полярного напряжения у военнослужащих в Арктике, которые не учитывают глубинной адаптации человека к экстремальным факторам. В связи с этим обосновывается целесообразность интеграции этнокультурных практик коренных народов Севера, выработанных в процессе многовекового естественного отбора.

Предлагается системный подход к адаптации мировоззренческих моделей, поведенческих стратегий практик аборигенных культур. Реализация выделенных направлений позволит сформировать устойчивые навыки психофизиологической саморегуляции и повысить боеспособность личного состава.

Ключевые слова: синдром полярного напряжения, Арктическая зона, военнослужащие, психолого-педагогическая профилактика, этнокультурные практики, коренные народы Севера.

ВВЕДЕНИЕ

Современные перспективы развития Арктического региона вызывают профессиональный интерес у широкого круга специалистов в области политики, оборонной сферы, экономики и науки [1]. Освоение арктических территорий и обеспечение национальной безопасности в высоких широтах сопряжены с необходимостью длительного пребывания воинских контингентов в условиях, экстремальных для человеческого организма.

Комплексное воздействие полярной ночи, низких температур, магнитных бурь, сенсорной и социальной депривации формирует уникальный патогенный комплекс, известный в научной литературе как синдром полярного напряжения [2]. Данное состояние характеризуется стойкими нарушениями в психофизиологической сфере, что закономерно приводит к снижению оперативных возможностей и боеготовности военнослужащих.

Существующие подходы к психолого-педагогической профилактике синдрома полярного напряжения в основном базируются на методах, разработанных для средних широт, и зачастую носят реактивный, а не превентивный характер. Они направлены на купирование уже возникших симптомов дезадаптации, таких как астения, депрессивные состояния, нарушения сна и когнитивные сбои, но недостаточно эффективны в формировании долгосрочных адаптационных резервов. Это создает методологический вакуум, требующий поиска инновационных, укорененных в специфике региона решений. В данном контексте представляется научно и практически обоснованным обращение к многовековому опыту коренных народов Арктики, которые демонстрируют феноменальную устойчивость к действию тех же экстремальных факторов. Интеграция этих практик в современную систему психолого-педагогического сопровождения может стать ключом к созданию эффективной превентивной модели профилактики синдрома полярного напряжения, основанной на принципах личной компетентности и саморегуляции.

Актуальность исследования обусловлена возрастающей геостратегической значимостью Арктического региона, что приводит к увеличению численности и продолжительности службы воинских контингентов в данном макрорегионе. Высокий уровень непроизводственных потерь, связанных с нарушениями психического здоровья и профессиональной надежности личного состава вследствие дезадаптации, наносит ощутимый ущерб обороноспособности

государства. Разработка новых эффективных методов сохранения психического здоровья и работоспособности военнослужащих в арктических условиях представляет собой одну из приоритетных задач военной медицины и педагогики.

Существенным аргументом в пользу актуальности выступает исчерпанность парадигмы чисто технократического подхода к обеспечению жизнедеятельности в высоких широтах. Несмотря на оснащение современным обогреваемым жильем, средствами индивидуальной защиты и качественным питанием, проблема психологической дезадаптации не теряет остроты. Это свидетельствует о неспособности техногенной среды полностью нивелировать патогенное влияние природных факторов на психику, что требует обращения к антропологическим и культурным ресурсам адаптации, накопленным аборигенным населением.

Дополнительным обоснованием актуальности выступает соответствие исследования государственной политике в области сохранения культурного наследия и интеграции знаний коренных народов в современные практики. Проведение специальных мероприятий, направленных на сбор и анализ успешного этнокультурного опыта для его последующего внедрения в различных сферах, включая оборонную, подчеркивает востребованность предлагаемого подхода. В целом, работа находится в русле современных этнополитических и социокультурных тенденций.

Целью настоящего исследования являются теоретическое обоснование, разработка и методическое структурирование комплексной модели интеграции этнокультурных практик коренных народов Арктики в существующую систему психолого-педагогической профилактики синдрома полярного напряжения у военнослужащих. Дальнейшая работа предполагает конкретизацию содержательного наполнения модели, методических принципов ее реализации и прогнозируемого психопрофилактического эффекта, направленного на усиление адаптационного потенциала и повышение уровня психологической устойчивости личного состава к комплексному воздействию экстремальных факторов арктического театра военных действий через поэтапное внедрение в повседневную и учебно-боевую деятельность адаптированных элементов традиционных знаний и навыков.

Для достижения поставленной цели в рамках исследования решаются следующие взаимосвязанные задачи: провести историко-культурологический анализ системы адаптационных практик коренных народов Арктики с выделением ключевых элементов, релевантных задачам профилактики синдрома полярного напряжения; осуществить деструктуризацию синдрома полярного напряжения на отдельные симптомокомплексы для точечного подбора соответствующих этнокультурных аналогов психокоррекционного воздействия.

Методологическую основу исследования составляет комплексная междисциплинарная парадигма, синтезирующая принципы системного анализа, культурно-исторической психологии и военной акмеологии. В работе применяется совокупность взаимодополняющих методов: теоретический анализ научной литературы по этнографии, полярной медицине и экстремальной психологии; сравнительно-сопоставительный метод для выявления аналогий между проявлениями синдрома полярного напряжения и традиционными способами их преодоления в аборигенных культурах; метод моделирования для проектирования структурно-функциональной схемы интеграции; экспертные оценки для валидизации предложенных методик. Ключевым методологическим принципом является рассмотрение этнокультурных практик не как набора разрозненных приемов, а как целостной системы, интегрирующей физиологический, психологический и социокультурный уровни адаптации.

ЭНДОКУЛЬТУРА ПОТЕНЦИАЛА КОРЕННЫХ НАРОДОВ АРКТИКИ КАК РЕСУРС ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ПРОФИЛАКТИКИ СИНДРОМА ПОЛЯРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Синдром полярного напряжения представляет собой системный дезадаптационный ответ организма на комплекс экстремальных факторов Арктики, патогенез которого связан с их

кумулятивным воздействием, нарушающим гомеостаз на всех уровнях функционирования [3]. Традиционные направления в психолого-педагогической профилактике зачастую носят узковедомственный характер, фокусируясь либо на медицинских, либо на сугубо психологических аспектах, игнорируя их неразрывную связь и социокультурный контекст. Коренные народы Арктики, такие как ненцы, чукчи, эвенки и др. [4], в процессе многовековой адаптации выработали целостные системы жизнеобеспечения. Данные системы характеризуются «конституционально-морфологическими параметрами и обратимыми функциональными перестройками, которые являются наиболее адекватными как климатическим условиям региона, так и конкретной этнической принадлежности» [5]. Их культурные коды содержат имплицитные знания о поддержании гомеостаза в условиях хронического стресса, что представляет огромный интерес для современной военной науки [6]. Изучение механизмов приспособительных реакций коренного населения позволяет выявить эффективные неспецифические методы повышения резильентности организма. Следовательно, интеграция этого опыта является не просто заимствованием отдельных техник, а стратегией формирования принципиально иной адаптационной парадигмы.

Проведенный системный анализ научных работ Ц. П. Короленко [7], Ф. Б. Березина [8], Л. Л. Соловенчука [9], Е. А. Бельчусовой [10], И. М. Спивака [11] и других исследователей позволил выявить уникальные культурные практики коренных народов Арктики, сформированные в процессе длительного исторического взаимодействия с суровой природной средой. Данные практики, включающие особые методы, представляют собой концентрированное знание о механизмах успешной психофизиологической адаптации к экстремальным условиям. Исследования демонстрируют, что эти этнокультурные элементы образуют целостную систему, обеспечивающую не только физическое выживание, но и психологическую устойчивость, что особенно ценно для разработки современных программ подготовки военнослужащих к службе в Арктическом регионе. Особый интерес представляет выявленная исследователями взаимосвязь между традиционными практиками и формированием специфического когнитивного стиля, характеризующегося развитым пространственным мышлением, способностью к длительной концентрации и устойчивостью к сенсорной депривации.

Одним из ключевых элементов профилактики является формирование особого типа восприятия пространства и времени, характерного для аборигенного сознания, которое основано не на противопоставлении себя враждебной среде, а на чувстве глубокой включенности в природный контекст [12]. Это мировоззрение эффективно компенсирует экзистенциальную тревогу и чувство отчуждения, столь характерные для вновь прибывающих военнослужащих, и может культивироваться через специальные педагогические тренинги.

ТРАДИЦИОННЫЕ ПРАКТИКИ КАК ОСНОВА КОРРЕКЦИИ СИНДРОМА ПОЛЯРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В рамках настоящего исследования, опирающегося на мировоззренческий фундамент коренных народов Арктики, была осуществлена операционализация синдрома полярного напряжения через его системную деструктуризацию на отдельные симптомокомплексы. Такой метод позволил провести точечный подбор соответствующих этнокультурных аналогов психокоррекционного воздействия, обеспечивающий адресность и эффективность профилактических мероприятий. На основе полученных данных был разработан и структурно организован цикл специальных занятий по формированию «арктического мышления», представляющий собой комплексную многоуровневую программу.

На первом этапе исследования был выделен когнитивный симптомокомплекс синдрома полярного напряжения, включающий нарушения пространственно-временной ориентации, снижение концентрации внимания и ухудшение оперативной памяти. Для коррекции данных

проявлений представляется эффективным применение традиционных практик навигации по природным ориентирам, составляющих ключевой модуль разрабатываемой программы.

Ключевым модулем данной программы является освоение методов навигации по природным ориентирам, которое предполагает отказ от привычной зависимости от GPS-технологий [13]. В рамках данного модуля военнослужащие учатся «читать» ландшафт, анализируя направление и силу преобладающих ветров, структуру и плотность снежного наста, специфику образования снежных заструг, а также поведенческие паттерны местной фауны [14].

Такой метод позволяет сформировать целостное восприятие арктической среды, развивая не только базовые сенсорные способности, но и высшие когнитивные функции, включая пространственное мышление, оперативный анализ и долгосрочное прогнозирование погодных условий. Систематическая практика ориентации без электронных средств способствует усилению когнитивной гибкости, позволяя оперативно перестраивать планы в условиях быстро меняющейся оперативной обстановки. Психологическим результатом этой работы становится рост уверенности в собственных силах и формирование психологической устойчивости к факторам неопределенности, характерным для Арктики.

Конечной целью цикла является выработка у личного состава способности к автономному принятию решений в условиях отказа техники, что напрямую повышает оперативную надежность подразделения. Умение ориентироваться по природным маркерам становится не только тактическим преимуществом, но и ключевым элементом психологической подготовки, снижающим уровень тревожности.

Реализация данной стратегии не только способствует преодолению проявления десинхроноза, но и формирует устойчивые механизмы психофизиологической саморегуляции. Интеграция традиционных знаний о ритмах природной среды в программу психолого-педагогической профилактики создает основу для эффективной адаптации военнослужащих к особым условиям Арктики. Это способствует сохранению оперативной готовности подразделений и снижению рисков, связанных с нарушением психофизиологического состояния личного состава в условиях экстремальной световой среды высоких широт.

Второй симптомокомплекс объединяет социокоммуникативные нарушения, проявляющиеся в повышенной конфликтности и снижении групповой сплоченности, для преодоления которых целесообразно использование традиционных форм группового взаимодействия и коммуникативных практик, основанных на принципах невербального общения и эмпатического слушания. Освоение техник активного слушания и «ненасильственного» общения улучшает взаимопонимание между сослуживцами, снижая уровень внутренней напряженности в замкнутом коллективе [15].

Методологический подход предполагает интеграцию практик невербальной коммуникации и технологий эмпатического диалога, исторически сложившихся в культурах северных этносов. Разработанный социально-коммуникативный модуль направлен на оптимизацию групповой динамики и создание эффективных механизмов разрешения конфликтов в условиях изолированного несения службы. Особое внимание уделяется формированию навыков рефлексивного слушания и освоению принципов конструктивного общения, способствующих снижению психологической напряженности.

Реализация данного способа обеспечивает не только нивелирование конкретных проявлений социокоммуникативной дезадаптации, но и создает основу для устойчивого развития коллектива. Дифференцированный отбор этнокультурных практик позволяет осуществлять целенаправленное психолого-педагогическое воздействие, соответствующее специфике выявленных нарушений. Это способствует формированию гармоничной социальной среды, минимизирующей риски развития деструктивных процессов в воинских подразделениях, несущих службу в условиях Арктики.

Командиры подразделений должны лично моделировать конструктивные паттерны коммуникативного поведения, выступая примером для подчиненных. Следовательно, развитие коммуникативной компетентности является неотъемлемой частью профилактики.

Третий выделенный в исследовании симптомокомплекс охватывает стойкие психофизиологические нарушения, связанные с десинхронозом циркадных ритмов и расстройствами архитектуры сна. Данные проявления обусловлены комплексным воздействием полярной ночи и полярного дня, приводящим к нарушению выработки мелатонина и дисбалансу в работе гипоталамо-гипофизарной системы. У военнослужащих наблюдаются характерные нарушения: инсомнические расстройства, фрагментация сна, дневная гиперсомния и синдром отсроченного засыпания, что существенно снижает их оперативные возможности.

Для коррекции данных нарушений предлагается применение традиционных техник регуляции сна сезонной адаптации, исторически сложившихся в культурах коренных народов Арктики. Особый интерес представляют практики световой гигиены с использованием естественных источников освещения, а также техники синхронизации биологических ритмов с природными циклами. Исследования подтверждают эффективность веками выработанных правил организации жизнедеятельности в условиях смены полярного дня и ночи, включающих специальные режимы активности и отдыха, основанные на многовековых наблюдениях за природными явлениями.

Методологическая основа исследования включает интеграцию этнокультурных практик в несколько взаимосвязанных направлений, а также использование аутентичных методов релаксации и дыхательных практик, применяемых коренными народами для нормализации психофизиологического состояния [16].

Физиологический механизм их действия заключается в синхронизации дыхательного ритма с вегетативной регуляцией, что способствует активации парасимпатической нервной системы и снижению симпатического тонуса. Несмотря на то, что эффективное применение данных методов требует от военнослужащего развитой самодисциплины и определенного уровня внутренней культуры, их освоение предоставляет уникальный инструмент аффективной саморегуляции. Этот инструмент позволяет осуществлять оперативный контроль над психофизиологическим состоянием без необходимости внешнего вмешательства, что особенно ценно в условиях изолированного несения службы.

В целом интеграция адаптированных дыхательных практик в систему психолого-педагогического сопровождения создает основу для формирования устойчивых навыков автономной психической саморегуляции. Это способствует не только купированию острых проявлений синдрома полярного напряжения, но и формированию долгосрочной психологической резистентности у военнослужащих, выполняющих задачи в экстремальных условиях Арктики.

Четвертый выделенный в исследовании симптомокомплекс охватывает нарушения психофизиологической адаптации, связанные с холодовым стрессом и повышенной метеочувствительностью. Данные проявления характеризуются дисфункцией системы терморегуляции, повышенной восприимчивостью к перепадам атмосферного давления и влажности, а также развитием устойчивых психосоматических реакций на погодные изменения. У военнослужащих наблюдаются нарушения периферического кровообращения, мышечный гипертонус, повышенная тревожность при изменении метеоусловий и снижение порога холодовой чувствительности.

Для коррекции данных нарушений предлагается применение традиционных методов терморегуляции и закаливания, исторически используемых коренными народами Арктики [17]. Особую эффективность демонстрируют практики постепенной адаптации к холодовым воздействиям через систему специальных процедур, включающих контрастные воздушные и водные воздействия. Методы традиционного закаливания основаны на принципе постепенного и систематического повышения устойчивости организма к экстремальным температурным воздействиям, что подтверждается современными исследованиями в области экологической физиологии. Особое значение имеет интеграция психотехник, направленных на формирование субъективного восприятия холода как естественного и управляемого фактора среды.

Пятый симптомокомплекс синдрома полярного напряжения характеризуется выраженными аффективными нарушениями, проявляющимися в эмоциональной лабильности, повышенной тревожности и склонности к депрессивным состояниям. Эмоциональная саморегуляция с использованием адаптированных этнокультурных техник занимает центральное место в структуре формируемых компетенций для борьбы с данными проявлениями.

Техника именования и принятия негативных эмоций, заимствованная из арсенала практик работы с состоянием, позволяет снизить их интенсивность и деструктивную силу через вербализацию и осознание. Использование методов копинг-поведения, направленного воображения и визуализации позволяет мысленно переноситься в ресурсные состояния, компенсируя сенсорный голод и монотонность ландшафта [18]. Создание индивидуального «банка» позитивных воспоминаний и образов, связанных с ощущением тепла, дома и безопасности, предоставляет внутренний материал для эмоциональной подпитки в сложные периоды.

Применение данных методов позволяет создать эффективную систему психологической самопомощи для военнослужащих, несущих службу в условиях изоляции и экстремальных климатических воздействий.

Разработанный подход способствует не только купированию острых аффективных нарушений, но и формированию устойчивых механизмов психологической адаптации к длительному пребыванию в условиях Арктики. Интеграция этнокультурных практик эмоциональной саморегуляции в программу психолого-педагогической профилактики создает основу для сохранения психического здоровья и поддержания профессиональной надежности военнослужащих.

Интеграция этих элементов в учебно-боевую деятельность требует тонкой и взвешенной адаптации, исключающей прямое копирование. Речь идет о дистилляции базовых психофизиологических принципов и их переложении на язык современных педагогических и психологических технологий, понятных и приемлемых для военнослужащих. Необходима разработка специализированного модуля для подготовки военных психологов и командиров, которые должны понимать не только технику проведения тех или иных упражнений, но и их культурный контекст и глубинный психофизиологический смысл. Внедрение должно носить поэтапный и добровольный характер, начиная с апробации отдельных техник в рамках экспериментальных подразделений с тщательным мониторингом их эффективности с помощью стандартизированных психодиагностических методик. Критериями эффективности должны стать как субъективные показатели, так и объективные данные о снижении заболеваемости и дисциплинарных нарушений. Данный метод обеспечит научную обоснованность и практическую целесообразность внедряемых мер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует высокий теоретический и прикладной потенциал интеграции этнокультурных практик коренных народов Арктики в систему психолого-педагогической профилактики синдрома полярного напряжения у военнослужащих. Предложенный подход позволяет перейти от симптоматической коррекции дезадаптационных нарушений к формированию целостной, устойчивой системы психофизиологической регуляции, основанной на принципах, верифицированных многовековым опытом успешного существования в экстремальной среде. Это открывает новые горизонты для повышения эффективности службы и сохранения здоровья личного состава в Арктической зоне.

Перспективы дальнейших исследований видятся в проведении широкомасштабной опытно-экспериментальной работы по апробации разработанной модели в реальных условиях арктических воинских коллективов. Необходима разработка конкретных учебных программ, методических пособий и критериев оценки эффективности для различных составляющих

предложенной системы. Дальнейшее углубление в этнографический материал и междисциплинарный синтез позволит расширить арсенал психопрофилактических средств, доступных военным психологам и педагогам, решающим сложнейшую задачу сохранения человеческого потенциала в условиях Арктики.

Список использованных источников

1. *Алехин С. Г., Иванов Р. Д., Шемелов В. А.* Количественные характеристики естественных климатических сезонов отдельных районов Арктического региона // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – № 677. – С. 70–74.

2. *Потяев П. Ю.* Факторы Арктической зоны, воздействующие на формирование синдрома полярного напряжения у военнослужащих арктических подразделений // Военно-правовые и гуманитарные науки Сибири. – 2024. – № 4(22). – С. 352–359.

3. *Казначеев В. П.*, *Куликов В. Ю.* «Синдром полярного напряжения» и некоторые вопросы экологии человека в высоких широтах // Вестник Академии наук СССР. – 1980. – Т. 50, № 1. – С. 74–82.

4. *Аверин А. Н.* Коренные малочисленные народы: динамика развития / Вестник Бурятского государственного университета. – 2015. – № 14–1. – С. 70–75.

5. *Колосова О. Н., Бельчусова Е. А., Николаева Е. Н.* Физиологические механизмы формирования адаптивных реакций организма коренных жителей Арктики в зимний период // Наука и образование. – 2015. – № 2(78). – С. 107–112.

6. *Попов М. В.* К вопросу об адаптации к суровым условиям Арктики аборигенов Арктической зоны Российской Федерации // Современные технологии в медицинском образовании : материалы международной научно-практ. конф., посвященной 100-летию Белорусского государственного медицинского университета, Минск, 01–05 ноября 2021 года. – Минск : Белорус. гос. мед. ун-т, 2021. – С. 1861–1863.

7. *Короленко Ц. П.* Психофизиология человека в экстремальных условиях. – Л. : Медицина, 1978. – 272 с.

8. *Березина Ф. Б.* Некоторые аспекты психической и психофизиологической адаптации человека в условиях Севера // Березин Ф. Б. : персональный сайт. – URL: https://berezin-fb.su/wordpress/psihicheskaja-adaptacija-i-organizacija-psihofiziologicheskih-sootnoshenij/nekotorye-aspekty-psihicheskoj-i-psihofiziologicheskoj-adaptacii-cheloveka/ (дата обращения: 14.11.2025).

9. *Соловенчук Л. Л.* Популяционно-генетические механизмы адаптации коренного и пришлого населения Северо-востока СССР к экстремальным условиям окружающей среды: автореф. дис. … д-ра мед. наук. – М., 1989. – 45 с.

10. *Бельчусова Е. А. Николаева Е. Н., Колосова О. Н.* Неспецифические адаптивные реакции организма коренных жителей Арктики // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 3. – С. 387.

11. Использование генетического паспорта при отборе для службы в Арктическом регионе / Спивак И. М. [и др.] // Клиническая патофизиология. – 2024. – Т. 30, № 4. – С. 94–98.

12. *Конышев В. Н., Лагутина М. Л.* Безопасность человека в Арктике: угрозы сквозь призму "северного менталитета" // Арктика и Север. – 2021. – № 45. – С. 85–112.

13. *Белякова М. Ф.* Ориентирование на местности без карты. – М. : Воениздат, 1955. – 70 с.

14. *Адаев В. Н.* Специфика ориентирования по сторонам света у тундровых ненцев // Вестник археологии, антропологии и этнографии. – 2018. – № 1(40). – С. 89–98.

15. *Христофорова О. Б.* Особенности коммуникативного поведения народов Сибири и их роль в межкультурном общении // Языковое сознание: формирование и функционирование / Рос. акад. наук, Ин-т языкознания. – М., 1998. – С. 224–231.

16. *Завьялова О. А.* Адаптация к холодному климату: роль генов в устойчивости жителей Севера к экстремальным условиям // Аллея науки. – 2024. – Т. 1, № 10 (97). – С. 7–12.

17. *Красильников В. П.* Закаливание как самобытное средство традиционного физического воспитания коренных народов Севера // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. : Образование, здравоохранение, физическая культура. – 2005. – № 4–1. – С. 119–120.

18. Особенности когнитивных ресурсов совладания с трудными жизненными ситуациями у представителей этнических групп Сибири / Т. Г. Бохан [и др.] // Сибирский психологический журнал. – 2016. – № 61. – С. 64–77.

О. В. Беленович;
А. В. Тарасов,
кандидат военных наук, доцент;
С. В. Федулов,
доктор исторических наук, доцент

ЛЕНИНГРАДСКАЯ ВОЕННО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ШКОЛА ЛЕТЧИКОВ – ШКОЛА ГЕРОЕВ. ГЕРОЙ СОВЕТСКОГО СОЮЗА ГВАРДИИ КАПИТАН Г. Д. ВАСИЛЬЕВ

85 лет назад началась Великая Отечественная война. Весомый вклад в Великую Победу над нацистской Германией внесли выпускники Ленинградской военно-теоретической школы ВВС РККА, которая в 1924–1933 годы подготовила большой отряд летчиков. Многие из них стали военачальниками, командовали авиационными полками, дивизиями, корпусами, были удостоены высокого звания Героя Советского Союза.

В статье, посвященной выпускнику Севастопольского военно-морского училища береговой обороны имени ЛКСМУ, Ленинградской военно-теоретической школы летчиков, Ейского военно-морского авиационного училища имени Сталина Григорию Дмитриевичу Васильеву, показан его жизненный и боевой путь.

Ключевые слова: Севастопольское военно-морское училище береговой обороны имени ЛКСМУ, Ленинградская военно-теоретическая школа ВВС РККА, авиационная эскадрилья, боевое задание.

После окончания Гражданской войны и интервенции руководство СССР получило возможность восстанавливать экономику государства и обеспечивать его обороноспособность, в том числе создавать авиационную мощь. Одна из задач создания авиации состояла в том, чтобы управлением и обслуживанием авиационной техники должны были овладеть рабочие и крестьяне – новые хозяева страны. Для этого в 1923 году было образовано добровольное Общество друзей воздушного флота, целью которого, в том числе, была подготовка летных кадров из рабочих и крестьян [1].

В сентябре 1924 года на базе Киевского военного училища и Егорьевской военной школы Красного воздушного флота в здании бывшего Павловского пехотного училища на улице Красного Курсанта была сформирована Военно-теоретическая школа ВВС РККА [2]. За время своего функционирования, благодаря умело организованной воспитательной и учебной работе талантливых педагогов и воспитателей, в стенах школы были подготовлены выдающие военачальники и летчики, прославившиеся в годы Великой Отечественной войны. Это дважды Герой Советского Союза генерал-майор авиации В. И. Раков; Герои Советского Союза: генерал-полковник авиации Е. Н. Преображенский, генерал-майор авиации П. И. Павлов, генерал-майор авиации Н. В. Челноков, полковник Ф. А. Усачев и многие другие. В славной плеяде героев-выпускников Ленинградской военно-теоретической школы видное место занимает Герой Советского Союза Григорий Дмитриевич Васильев.

Суров и тернист был жизненный путь Григория Дмитриевича. Его целеустремленность в достижении высот профессионального мастерства послужит поучительным примером для современных летчиков и будущих поколений. Жизнь и деятельность летчика морской авиации Военно-Морского Флота нашей страны – настоящий образец служения Отечеству.

28 сентября 1911 года на Орловщине, в деревне Субботово, в семье Гончарова Дмитрия Емельяновича, рабочего-шахтера Криворожских рудников, и Марфы Михайловны появился первенец – сын Григорий. Тяжело началось детство Григория, в возрасте трех лет он лишился отца, погибшего при катастрофе в шахте. Мать работала прислугой, уборщицей, работницей на кондитерской фабрике в Брянске. Так, без особой материнской ласки, порой без хлеба, тепла и уюта рос Григорий до десяти лет, когда мать вторично вышла замуж за Васильева

Лаврентия Герасимовича – рабочего Николаевской писчебумажной фабрики в Кингисеппском районе.

С этого момента начинается трудовая жизнь Григория Васильева. Не желая обременять отчима и выслушивать его упреки, Григорий нанимается батраком к местному «богатею», пасет скот, ходит за плугом, получая за весь сезон работ один куль хлеба (восемь пудов). С завистью смотрел он, как его обеспеченные сверстники – свободные, шумные и беспечные – стайками бежали в школу. Григорий «… решил сберегать заработанный хлеб и зимой учиться. Но не удавался расчет. Хлеба не хватало, так как отчим забирал его на всю семью, и Григорию приходилось бросать учебу, уходить в лес на заготовки дров» [3].

Постоянные притязания и упреки отчима довели Григория до того, что он решил бежать из дома. Три месяца он скитался по деревням, селам и городам, наконец встретился с комсомольцами Кингисеппа, которые устроили его учиться в школу крестьянской молодежи в селе Котлы. Это было в 1925 году. Здесь вскоре Григорий вступил в комсомол и стал вожатым пионерского отряда [3].

В 1927 году комсомольская организация устраивает Григория Васильева на работу учеником продавца в деревне Стремление Котловского сельского совета, а затем в 1928 году он поступает на курсы при техникуме потребкооперации в Ленинграде. Но не нравилась Григорию перспектива быть работником прилавка. С детства привыкший к тяжелому физическому труду, к простору, он тяготился своей учебой в техникуме. В этот момент шел набор комсомольцев во флот, в Военно-морское училище имени Фрунзе. Васильев одним из первых подает заявление с просьбой принять его в училище. В 1930 году Григорий Васильев зачисляется курсантом училища на отделение береговой обороны, но затем переводится на учебу в Севастополь в Военно-морское училище береговой обороны имени ЛКСМУ.

Трудно было учиться Васильеву. Сказывалось отсутствие достаточной общеобразовательной подготовки, но тем упорнее был он в своем стремлении постичь науку, не отстать от товарищей. Он добивается успеха, переходя из года в год на старшие курсы. В училище в 1931 году Г. Д. Васильев становится кандидатом, а в 1932 году – членом ВКП(б). В то время, когда курсант Васильев был уже на третьем курсе, проводился специальный набор молодежи в военные авиационные учебные заведения. Среди отобранных для этой цели оказался и Григорий. Не хотелось расставаться с училищем береговой обороны, но на то была воля партии, и Васильев подчинился.

Начинается новая глава в жизни Григория Дмитриевича. С августа 1933 года он учится в Ленинградской военно-теоретической школе летчиков, после ее окончания поступает в Военно-морское авиационное училище имени Сталина в городе Ейске.

Вот и первый учебный полет на самолете «У-2». Волнение, предвкушение, радость, восторг – настоящий вихрь эмоций и чувств охватил Васильева с самых первых минут полета. Так началась история летчика. Именно в этот момент курсант твердо решил, что посвятит свою жизнь полетам. Он сказал себе: «Да, теперь-то я уж буду летчиком». Вскоре последовал и самостоятельный вылет на «У-2». Точность выполнения указаний инструктора, безупречная техника пилотирования, скромность, высокая дисциплинированность – все это позволило Григорию Дмитриевичу стать отличником. Г. Д. Васильев – настоящий авторитет для курсантов – избирается ими партийным руководителем, в дальнейшем его назначают командиром отделения.

В ноябре 1936 года из Военно-морского авиационного училища имени Сталина вышел летчик морской авиации лейтенант Григорий Дмитриевич Васильев [4]. Перед отправкой в боевую часть командир учебной эскадрильи сказал Г. Д. Васильеву: «Учтите, что учеба не кончилась. По-настоящему она начнется в части. В училище Вы только научились летать. Чтобы быть законченным летчиком, нужно постоянное совершенствование...». Г. Д. Васильев глубоко усвоил напутствие своего учителя.

В конце 1936 года Васильев прибыл в 124-ю дальнебомбардировочную авиационную эскадрилью (ДБАЭ) ВВС Черноморского флота (ЧФ). Он был назначен вторым летчиком на

трехмоторный самолет «МТБ-1» в экипаж командира отряда капитана П. М. Лемежко (впоследствии командующий ВВС Тихоокеанского флота, генерал-лейтенант авиации. – *Прим. авт.*). Так начинается становление Г. Д. Васильева как летчика, способного совершать дальние рейсы в любых условиях, днем и ночью. Тренировочные полеты над Черным морем Г. Д. Васильев совершает на полный радиус, продолжительностью 12–13 часов. Именно здесь он развил в себе столь необходимые для летчика-торпедоносца качества: выносливость и самообладание, а также отточил мастерство полетов над морем на любых высотах и в любых условиях. Вскоре Г. Д. Васильев становится первым летчиком экипажа и в 1938 году направляется на боевые действия у озера Хасан.

В то время повоевать лейтенанту Васильеву не удалось. К моменту его прибытия в район операции конфликт был закончен. Он назначается в ВВС Тихоокеанского флота (ТОФ) командиром 15-го Отдельного авиационного отряда. Летает на самолете «МБР-2» на полный радиус. С момента объявления о нападении Германии на Советский Союз Г. Д. Васильев одним из первых заявил командованию о своем желании воевать на фронте с немецко-фашистскими захватчиками. Однако просьба не была удовлетворена. Старшему лейтенанту Васильеву приказали освоить новую материальную часть – самолет «Ч-2» и готовиться к выполнению длительных и сложных полетов.

Г. Д. Васильев, к этому моменту исполняющий обязанности командира авиационной эскадрильи, со свойственными ему энтузиазмом и напористостью берется за выполнение приказа и вскоре осваивает новый самолет. 8 октября 1942 года старший лейтенант Г. Д. Васильев был направлен в Высшее военное авиационное училище имени Леваневского, получив назначение во вновь формируемый авиаполк, готовившийся к отправке на фронт. В авиаполку он осваивает скоростной бомбардировщик (СБ) и самолет «Бостон», поставляемый по ленд-лизу.

В марте 1943 года уже в звании капитана Г. Д. Васильев назначается летчиком в 1-й ГМТАКП [5]. О славе полка, в котором служил теперь капитан Васильев, он слышал еще на Дальнем Востоке, читал в газетах. Знал, что полк одним из первых получил высокое гвардейское звание за свои боевые успехи в нанесении мощных бомбовых ударов по врагу на подступах к Ленинграду. Славу полку принесли летчики-герои:

– Е. Н. Преображенский – выпускник Ленинградской военно-теоретической школы ВВС РККА 1929 года, Герой Советского Союза. В ночь с 7 на 8 августа 1941 года возглавлял группу летчиков на 15 самолетах для нанесения первого бомбового удара по военно-промышленным объектам Берлина, генерал-полковник авиации [6];

– Н. В. Челноков – окончил Ленинградскую военно-теоретическую школу летчиков ВВС РККА в 1929 году, Герой Советского Союза, генерал-майор авиации [7];

– М. Н. Плоткин – выпускник Ленинградской военно-теоретической школы летчиков 1932 года, Герой Советского Союза. В ночь с 7 на 8 августа 1941 года участвовал в нанесении первого бомбового удара по военно-промышленным объектам Берлина, 9 августа 1941 года второй раз участвовал в бомбардировке Берлина. Погиб 7 марта 1942 года в районе Сестрорецка [8];

– П. И. Хохлов – Герой Советского Союза, генерал-лейтенант авиации [9];

– В. А. Гречишников – Герой Советского Союза, принимал участие в нанесении первого бомбового удара по военно-промышленным объектам Берлина в ночь с 7 на 8 августа 1941 года. Погиб 24 октября 1941 года в районе Грузино.

Капитан Васильев решил учиться на опыте старших товарищей и достойно нести славу полка, преумножая ее своими боевыми достижениями. Его не смутило и не обидело, что командование поставило его рядовым летчиком. Он понимал, что необходимо приобрести боевой опыт, зарекомендовать себя в бою как опытного летчика, и тогда будут обеспечены всеобщее уважение и авторитет.

День 14 июля 1943 года значился у капитана Васильева «историческим»: он впервые взлетел на выполнение боевого задания ночью (на бомбежку важного объекта противника). Ведущим шел Герой Советского Союза В. А. Балебин. Он сказал Г. Д. Васильеву: «Полет будет не из простых. Лететь будем и в облаках, и над облаками. Безусловно, встретим сильное сопротивление зенитной артиллерии противника. Если при всем этом ты не отстанешь от меня, не свернешь с боевого курса – значит, ты боевой летчик». Капитан Васильев волновался. Его не пугала мысль о том, что он может не вернуться с задания живым. В первую очередь он опасался ударить в грязь лицом в первом же полете. Только к концу маршрута Васильев смог унять тревогу и по-настоящему почувствовать уверенность в собственных силах. Следуя за В. А. Балебиным, он пробил не один ярус облаков, столкнувшись со сплошной завесой зенитного огня, не свернул с боевого курса, убедился, что бомбы, сброшенные ими, попали точно в цель и от разрывов в воздух взлетел эшелон противника.

После приземления на своем аэродроме Г. Д. Васильев спросил: «Ну, как?» – «Одним словом – молодец!» – ответил Балебин, крепко пожимая ему руку. Смущенно улыбаясь, Васильев сказал: «Стреляют черти здорово. Теперь я понимаю, что такое война. Ну ничего – злее буду».

С этого дня началась боевая работа капитана Г. Д. Васильева. День за днем, ночь за ночью он летал то на бомбежку аэродромов и других важнейших военных объектов противника, то на постановку мин в водах Балтики и Финского залива. Вместе с количеством боевых вылетов росло и мастерство Г. Д. Васильева. Он уже сам водил звенья самолетов, овладевал противозенитным маневром, вырабатывал свою тактику заходов на цель. Пусть неистовствуют зенитки, но Васильев не сбрасывал бомбы за один заход, он делал несколько, корректируя попадания бомб [10].

В ходе боевых вылетов капитан Г. Д. Васильев не раз сталкивался с истребителями противника, однако благодаря умелому использованию облачности и обладанию высокой натренированностью в слепом полете всегда оставался неуязвимым.

День 23 июля 1943 года также стал знаменательным в жизни капитана Г. Д. Васильева. В этот день ему впервые доверили производство крейсерства – свободного поиска кораблей противника в море и их уничтожение. В полку было принято считать: если летчику дано такое задание, то это значит, что он уже достиг совершенства в других боевых полетах, так как крейсерский полет и торпедирование корабля есть своего рода искусство, настоящий героизм.

В первый же крейсерский полет капитан Г. Д. Васильев преумножил боевой счет полка. В этом полете он со своим штурманом А. И. Рензаевым (Герой Советского Союза, выпускник Ленинградской военно-теоретической школы летчиков [11]. – *Прим. авт.*) потопил транспорт водоизмещением 6000–7000 тонн. Этот полет Григорий Дмитриевич называл в шутку учебно-тренировочным. Дело в том, что транспорт шел без охранения и почти не оказывал сопротивления. Капитан Г. Д. Васильев, зайдя в атаку в первый раз, не был удовлетворен своим заходом. Решил учесть ошибки и зайти вторично, чтобы поразить цель наверняка. И он это сделал.

Более десяти часов длился первый крейсерский полет капитана Васильева. Несколько часов по приборам вел он свой самолет сквозь дождевые тучи и облака. Весь ранее накопленный опыт в технике пилотирования, натренированность в длительных полетах над Черным морем и на Дальнем Востоке весьма пригодились ему сейчас. С этого полета Г. Д. Васильев неизменно летал только на крейсерские задания.

Вскоре он приносит полку новую победу. Далеко от родных берегов, вблизи одной из военно-морских баз Германии, долго ходил он в сумрачном осеннем Балтийском небе и наконец обнаружил два идущих в кильватере транспорта. Решение атаковать противника было принято немедленно. Все расчеты были сделаны, и грозная машина гвардии капитана Васильева устремилась в атаку.

Транспортные суда встретили атаку Васильева ожесточенным огнем зенитной артиллерии и пулеметов, осколки снарядов и бронебойные пули пронизывали самолет, но ничто не могло сломить решимости капитана Васильева. Собрав всю волю в кулак, он шел на сближение с целью. Только когда была достигнута необходимая дистанция и другие исходные данные, он нанес смертельный удар. В архивных документах этот бой описан так: «Охваченный пламенем, окутанный дымом, чудовищно задрав нос к небу, транспорт пошел на погружение. Бреющим полетом над территорией противника привел капитан Г. Д. Васильев израненную машину на свой аэродром» [12].

Под натиском яростного сопротивления противника и в условиях постоянной опасности боевой дух летчика только крепчал: выработались непоколебимая воля к победе, твердая решимость и готовность пожертвовать собой ради выполнения долга летчика-офицера. В одном из полетов Васильев обнаружил большой транспорт, конвоируемый несколькими сторожевыми кораблями. Сложность и опасность атаки были очевидны. Заметив советский самолет, корабли охранения открыли мощный заградительный огонь.

«Иду на риск», – сказал Васильев членам своего экипажа и ринулся в атаку на транспорт. У него уже созрело решение, что в случае, если самолет будет подбит, он произведет таранный удар. Однако и на этот раз военное счастье сопутствовало ему. Мощная советская машина, управляемая рукой летчика, прорвалась сквозь зону смерти. Снова воды Балтики поглотили несколько тысяч тонн немецкой техники, а вместе с ней и множество солдат противника. На аэродроме техники вновь восстанавливали поврежденный самолет Г. Д. Васильева [13].

За короткий срок осени 1943 года гвардии капитан Васильев (рис. 1) потопил транспорты водоизмещением 28000 тонн. Правительство высоко оценило боевые достижения Григория Дмитриевича, наградив его в сентябре 1943 года двумя орденами Красного Знамени [14]. 24 февраля 1944 года «за образцовое выполнение боевых заданий командования на фронте борьбы с немецкими захватчиками и проявленные при этом отвагу и геройство» Указом Президиума Верховного Совета СССР «О присвоении звания Героя Советского Союза офицерскому и сержантскому составу Военно-Морского флота» капитану Васильеву Григорию Дмитриевичу присвоено звание Героя Советского Союза с вручением ордена Ленина и медали «Золотая Звезда» за номером 2922 [15].



Рис. 1. Гвардии капитан Г. Д. Васильев [16]

Командование вверило под его руководство лучшую эскадрилью части, награжденную еще во время войны с белофиннами в 1939-1940 годы орденом Красного Знамени, эскадрилью, воспитавшую десяток героев [14].

В сентябре 1944 года гвардии капитан Г. Д. Васильев был направлен на учебу на Высшие офицерские курсы ВВС ВМФ, после их окончания в январе 1945 года он вернулся в свою часть на должность помощника командира авиаполка по летной подготовке и воздушному бою. К концу войны летчик выполнил 55 боевых вылетов.

После Великой Отечественной войны окончил Военно-морскую академию и командовал авиационными частями. В октябре 1958 года полковник Г. Д. Васильев был уволен в запас. Проживал и работал в Евпатории. Скончался 20 ноября 1978 года, похоронен на аллее Героев в Евпатории.

Герой Советского Союза полковник Г. Д. Васильев был удостоен следующих наград: два ордена Ленина, три ордена Красного Знамени, орден Ушакова 2-й степени, орден Красной Звезды; медали «За боевые заслуги», «За оборону Ленинграда» и др. [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в стенах Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (одного из исторических последователей Ленинградской военно-теоретической школы ВВС РККА) проходят службу, работают, учатся, продолжают славные традиции внуки и правнуки поколения, одержавшего Великую Победу над нацистской Германией. Они проявляют мужество, героизм, верность воинскому долгу и народу в ходе специальной военной операции.

Список использованных источников

1. *Яковлев А. С.* Цель жизни: записки авиаконструктора. – М. : Политиздат, 1974. – 591 с.

2. *Конорев В. В. Белянкина В. Ю., Бурлаков В. В.* Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского: Исторические предшественники. – СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2012. – 277 с.

3. Филиал ЦАМО РФ (архив ВМФ). – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 1. – Л. 279.

4. Там же. – Л. 102.

5. Там же. – Л. 103.

6. *Лурье В. М.* Адмиралы и генералы Военно-Морского флота СССР в период Великой отечественной и советско-японской войн (1941-1945) – СПб. : Русско-балтийский информационный центр БЛИЦ, 2001. – 280 с.

7. *Лурье В. М.* Адмиралы и генералы Военно-Морского Флота СССР, 1946–1960. – СПб. : Кучково поле, 2007. – С. 539.

8. Плоткин Михаил Николаевич // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения: 02.02.2026).

9. *Лурье В. М.* Указ. соч. – С. 534.

10. Филиал ЦАМО РФ (архив ВМФ). – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 1. – Л. 104.

11. Рензаев Алексей Иванович // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения 02.02.2026).

12. Филиал ЦАМО РФ (архив ВМФ). – Ф. 596. – Оп. 40. – Д. 150. – Л. 55.

13. Филиал ЦАМО РФ (архив ВМФ). – Ф. 596. – Оп. 40. – Д. 150. – Л. об.

14. Филиал ЦАМО РФ (архив ВМФ). – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 11. – Л. 106.

15. Васильев Григорий Дмитриевич // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения: 27.01.2026).

16. Филиал ЦАМО РФ (архив ВМФ). – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 11. – Л. 107.

К. Б. Муксинов,
кандидат военных наук;
А. В. Тарасов,
кандидат военных наук, доцент;
С. В. Федулов,
доктор исторических наук, доцент

БОЕВАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВЫПУСКНИКА ВОЕННО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ КРАСНОГО ВОЗДУШНОГО ФЛОТА П. И. ПАВЛОВА И ЕГО УЧЕНИКОВ В БИТВЕ ЗА ЛЕНИНГРАД

В год 80-летия Великой Победы, в соответствии с Указом Президента Российской Федерации В. В. Путина, 9 августа утверждено Днем воинской славы России, посвященным окончанию Ленинградской битвы. Данное событие свидетельствует о значимости и величии подвига защитников Ленинграда. В статье рассматриваются отдельные эпизоды боевой деятельности одного из выпускников Военно-теоретической школы Красного воздушного флота, летчика, командира истребительного авиационного полка, Героя Советского Союза Павла Ивановича Павлова и его подчиненных-учеников в Ленинградской битве.

Ключевые слова: Военно-теоретическая школа Красного воздушного флота, Герой Советского Союза, летчики-истребители, 21-й истребительный авиационный полк.

Военно-теоретическая школа Красного воздушного флота была образована в сентябре 1924 года в соответствии с приказом Революционного военного совета (РВС) СССР № 224/25 и начальника Военно-воздушных сил (ВВС) Рабоче-крестьянского воздушного флота (РККВФ) № 593 на базе Киевского военного училища Красного воздушного флота и Егорьевской военной школы Красного воздушного флота. Школа размещалась в здании бывшего Павловского училища на улице Красного Курсанта [1].

Военно-теоретическая школа функционировала до 1933 года. Срок обучения составлял два года. В стенах школы начали свой путь многие легендарные личности – военачальники ВВС, Герои Советского Союза. Один из них – генерал-майор авиации Герой Советского Союза П. И. Павлов (рис. 1).



Рис. 1. Командир 21-го ИАП подполковник Павлов Павел Иванович, 1944 г. [13]

Павел Иванович родился 21 августа 1908 года в Москве в семье рабочего-литейщика. До 1924 года учился в городской школе. С 1924 по 1929 год работал на химико-фармацевтическом заводе имени Семашко, одновременно с этим учился в вечерней школе для повышения квалификации, благодаря чему получил специальность «вакуум-аппаратчик». В 1928–1929 годы учился авиационному и химическому строительству (ОСОВИАХИМ) в вечерней Московской планерной школе № 1 Общества содействия обороне.

В 1929 году по набору поступил в Военно-теоретическую школу летчиков в Ленинграде, по окончании которой был зачислен в школу морских летчиков имени Сталина в городе Ейск, которую успешно окончил в 1932 году. Командованием школы было принято решение назначить Павла Ивановича на должность летчика-инструктора, в течение следующих шести лет он обучал летные кадры.

В 1938 году перевелся в 5-й истребительный авиационный полк (ИАП), где служил в должности командира звена, а потом командира авиационной эскадрильи. В этой должности П. И. Павлов участвовал в Советско-финляндской войне (1939-1940), в ходе которой за проявленные мужество и отвагу был награжден орденом Красного Знамени.

Когда началась Великая Отечественная война, П. И. Павлов, будучи командиром авиационной эскадрильи, служил в этом же полку. В связи с началом формирования в октябре 1941 года 21-го ИАП, для обучения молодых летчиков и их боевого слаживания требовались опытные командиры. П. И. Павлов был направлен в этот полк, в составе которого в апреле 1942 года продолжил принимать участие в Ленинградской битве. Этот же полк он возглавил в июне 1943 года в звании подполковника.

За период боевой работы подполковник П. И. Павлов произвел 464 боевых вылета на сопровождение и прикрытие пикирующих бомбардировщиков, торпедоносцев и штурмовиков, наносивших удары по кораблям, военно-морским базам и другим объектам противника; на прикрытие Дороги жизни в блокадный Ленинград.

За время Великой Отечественной войны провел 44 воздушных боя, в которых лично сбил одиннадцать самолетов противника и еще пять – в группе [2].

Боевую деятельность П. И. Павлова характеризует ряд значимых эпизодов. В одном из боевых вылетов (он летал тогда на самолете «И-16») подполковник П. И. Павлов один подвергся нападению четырех истребителей противника «Ме-109». Численное и техническое превосходство врага было очевидным. Кругом только море. Павлов отчетливо понимал, что ему грозит неминуемая гибель. Бой разгорался. Внезапно на горизонте показались наши корабли. Смекалка летчика спасла его от смерти. Он снизился к кораблям и встал под защиту их мощной зенитной артиллерии. Вражеские самолеты были отогнаны.

17 марта 1944 года группа летчиков полка под командованием подполковника П. И. Павлова сопровождала бомбардировщики «Пе-2», которые направлялись для нанесения бомбового удара по порту Хамина. На подходе к цели они были атакованы двадцатью фашистскими истребителями «ФВ-190» и «Ме-109». Советские пилоты приняли воздушный бой, в ходе которого подполковник И. П. Павлов отразил лобовую атаку истребителя «Ме-109» на бомбардировщик «Пе-2», а также спас своего ведомого, в хвост самолета которого заходил вражеский истребитель.

20 апреля 1944 года после ремонта своего самолета подполковник П. И. Павлов поднялся на нем в воздух для проведения пробного полета. В это же время им была получена информация от оператора станции наблюдения и связи (СНиС) о том, что в районе Койвисто появились два истребителя противника типа «ФИАТ-50». Получив целеуказание, командир полка П. И. Павлов полетел в район появления противника, атаковал и поджег самолет ведущего. Ведомый, потеряв своего напарника, пошел на него в лобовую атаку. Быстрым мастерским маневром П. И. Павлов отбил ее и, догнав первый самолет врага, вогнал его в воду [3]. После этого командир полка продолжил облет отремонтированного самолета. Этот бой наблюдали матросы с Толбухина маяка. Их командир представил подтверждение о сбитом

вражеском самолете на командный пункт авиационной дивизии. Командир дивизии генерал-майор авиации А. Н. Суханов по телефону за сбитый вражеский самолет объявил П. И. Павлову благодарность, а за то, что он как командир полка на неиспытанном самолете, в одиночку, без прикрытия вступил в бой с превосходящими силами противника, наложил дисциплинарное взыскание [4].

Смелость, мужество, отличное знание своего дела, смекалка в бою, воля к победе, самоотверженность – таковы отличительные черты героя [5], которые были сформированы в стенах Военно-теоретической школы Красного воздушного флота.

Герой Советского Союза подполковник П. И. Павлов за 15 лет своей летной деятельности воспитал сотни советских соколов. Полк под его руководством прославился своими боевыми делами, воспитал десятки замечательных летчиков, которые за время Великой Отечественной войны сбили 252 самолета противника. Подполковник П. И. Павлов с нуля обучил их летному мастерству, воспитал в них смелость, мужество, героизм, волю к победе, самопожертвование. И они в повседневной боевой деятельности проявляли эти качества.

Так, командир звена старший лейтенант И. М. Емельяненко во время прорыва блокады Ленинграда вылетел в составе пары на прикрытие штурмовиков «Ил-2», наносящих удар по позициям противника. В это время появились четыре истребителя противника «Ме-109». Завязался воздушный бой, в ходе которого И. М. Емельяненко своим самолетом прикрыл самолет ведущего группы штурмовиков от атаки истребителя противника, сбив вражеский самолет и получив при этом ранение.

Во время одного из боевых вылетов старший лейтенант И. М. Емельяненко, летавший в паре с молодым летчиком Жолобовым, был атакован над территорией противника двумя самолетами «ФВ-190». Завязался воздушный бой. Летчик Жолобов успешно сбил один самолет, второй – попытался зайти в хвост И. М. Емельяненко, но тот, выполнив ловкий маневр, сам оказался позади врага. Однако стрелять было уже нечем – иссяк весь боезапас. Старший лейтенант И. М. Емельяненко винтом своего самолета отрубил «хвостовое оперенье» вражескому самолету, и тот камнем упал на землю. И. М. Емельяненко благополучно приземлился. За свою боевую работу, за отвагу и мужество старший лейтенант И. М. Емельяненко был неоднократно награжден орденами и медалями [6].

В одном из воздушных боев над вражеской территорией лейтенант П. С. Стручалин был тяжело ранен осколком вражеского снаряда, но, несмотря на тяжелое ранение, из боя не вышел, а с еще большим ожесточением продолжал противостоять врагу. Пара наших самолетов вела бой с шестеркой вражеских самолетов «Ме-109ф». В этом бою два советских летчика сбили «Ме-109ф». Лейтенант П. С. Стручалин, обессилевший от потери крови, благополучно произвел посадку вблизи линии фронта. Его самолет был изрешечен осколками вражеских снарядов. За проявленную храбрость и самоотверженность в боях лейтенант П. С. Стручалин был награжден двумя орденами Красного Знамени и медалью «За оборону Ленинграда».

20 августа 1944 года группа советских летчиков на четырех самолетах под командованием капитана В. И. Ткачева вылетела на свободную охоту за самолетами противника. Над линией фронта встретила группу самолетов противника в составе 18 бомбардировщиков «Ю-87». Враг с полным грузом бомб шел бомбить наши объекты. В этом воздушном бою летчиками под командованием капитана В. И. Ткачева было сбито шесть самолетов врага. Сам капитан В. И. Ткачев лично сбил два самолета «Ю-87». Противник в панике сбросил бомбы на своей территории и рассеялся. Сорвав бомбардировку, летчики полка потерь не имели. В последующем капитан В. И. Ткачев стал отличным воздушным бойцом [7].

Старший лейтенант Е. В. Макаров провел 20 воздушных боев, в которых четыре самолета противника сбил лично, еще четыре – в составе группы. 16 сентября 1944 года Е. В. Макаров, прикрывая в составе группы самолеты-бомбардировщики «Пе-2», погиб, совершив лобовой таран вражеского истребителя.

10 июня 1943 года лейтенант В. П. Щербина, выполняя боевое задание в качестве ведомого в паре с командиром авиационной эскадрильи, заметил самолет противника «Ю-88», предпринимавший попытки сфотографировать наши объекты, и доложил об этом командиру. Вслед за ним он смело пошел в атаку. В воздушном бою огнем стрелка вражеского «Ю-88» был сильно поврежден самолет командира эскадрильи. Лейтенант В. П. Щербина, прикрывая своего командира, проводил его до аэродрома, проследил за успешной посадкой, а сам вернулся к месту воздушного боя и все-таки сбил самолет противника.

Капитан Ю. В. Храмов, выполняя боевое задание 2 сентября 1944 года, был вынужден произвести посадку на территории противника в результате повреждения материальной части самолета. Воздушное судно потерпело крушение, Ю. В. Храмов получил ранение, но нашел в себе силы выбраться. Тридцать часов он шел по территории противника, пробираясь к линии фронта. Благодаря мужеству и хладнокровию, он благополучно перешел линию фронта и вернулся в часть.

Майор Д. А. Кудымов воевал в 1937-1938 годы добровольцем в Японо-китайской войне на стороне Китайской республики, в годы Великой Отечественной войны защищал три города-героя: Одессу, Севастополь и Ленинград. Успешно возглавлял группы по сопровождению самолетов-бомбардировщиков и самолетов-штурмовиков, выполняющих задачи бомбоштурмовых ударов по противнику. Например, группа из шести самолетов, ведомая майором Д. А. Кудымовым, вылетела на боевое задание. При подходе к цели восемь истребителей противника «Ме-109» пытались атаковать наши самолеты. Летчики полка не допустили противника к сопровождаемым самолетам и сбили в воздушном бою четыре вражеских самолета, не потеряв ни одного из своих. В этом бою майор Д. А. Кудымов лично сбил один самолет противника «Ме-109».

В мае 1944 года группа из восьми самолетов полка, ведомая майором Д. А. Кудымовым, вылетела на сопровождение бомбардировщиков «Пе-2». При отходе от цели истребители противника, а именно 9 «Ме-109» и 7 «ФВ-190», пытались атаковать самолеты «Пе-2». В завязавшемся воздушном бою летчики, руководимые майором Д. А. Кудымовым, сбили пять самолетов противника, не потеряв ни одного из своих прикрываемых самолетов. В этом бою майор Д. А. Кудымов лично сбил один самолет противника.

Капитан А. Г. Ломакин 24 апреля 1943 года выполнял боевое задание ведущим четырех истребителей. По радио ему передали информацию о том, что в указанном районе были обнаружены шесть истребителей противника. А. Г. Ломакин смело повел свою четверку в бой с численно превосходящим противником. В десятиминутном воздушном бою наши летчики сбили два вражеских истребителя, одного из них сбил А. Г. Ломакин. Летчики полка потерь не имели.

31 августа 1943 года капитан А. Г. Ломакин, командуя звеном, вылетел на сопровождение самолетов «Пе-2». В районе цели четыре истребителя противника «ФВ-190» пытались противодействовать советским бомбардировщикам. Капитан А. Г. Ломакин, зайдя со стороны солнца, атаковал один из них. Машина вспыхнула в воздухе и, объятая огнем, рухнула на землю. После этого он смело вступил в бой с двумя «ФВ-190», которые, не выдержав атаки, вышли из боя. Советские бомбардировщики без потерь выполнили боевую задачу [8].

Командир авиационной эскадрильи капитан В. А. Свешников успешно выполнял боевые вылеты на сопровождение штурмовиков, бомбардировщиков и торпедоносцев. В бою 14 января 1943 года самолет капитана В. А. Свешникова был подбит – прямое попадание снаряда в мотор, который сразу отказал. В. А. Свешников благополучно перетянул за линию фронта и мастерски посадил самолет на маленькую поляну, тем самым сохранив дорогостоящую материальную часть и собственную жизнь.

При штурме вражеского аэродрома самолет В. А. Свешникова получил попадание снаряда в плоскость и патронный ящик. Благодаря умению и желанию во что бы то ни стало спасти самолет, В. А. Свешников благополучно привел его на свой аэродром и посадил. Совершил 220 боевых вылетов, провел 28 воздушных боев, имел пять личных и пять групповых побед.

3 сентября 1944 года при выполнении боевого задания капитан В. А. Свешников погиб смертью героя.

Необходимо отметить, что в 21-м ИАП воевал еще один Павлов – Павел Ильич. Чтобы не было путаницы, летчики полка между собой в отношении командира полка говорили Павлов «большой», а в отношении Павла Ильича – Павлов «маленький» (рис. 2). Командир авиационной эскадрильи капитан П. И. Павлов воевал на фронте с июня 1941 года.



В Краснознамённой истребительной части вместе сражаются однофамильцы Павловы. Один из них — командир части подполковник **Павел Иванович Павлов**, второй—**командир эскадрильи капитан Павел Ильич Павлов**. Вместе они начали свою славную боевую деятельность в первые дни Великой отечественной войны. Капитан Павлов, сбив первый самолёт, открыл боевой счёт своей части. Сейчас они одержали 15 побед каждый. **На снимке: подполковник Павлов поздравляет капитана Павлова с его новой победой**

Фото В. Горбунова

Рис. 2. Из материалов газеты «Ленинградская правда» № 180 от 29.07.1944 г.

21 октября 1943 года четверка летчиков полка, ведущим которой был капитан П. И. Павлов, вылетела на боевое задание по сопровождению бомбардировщиков «Пе-2». Над целью их встретили восемь истребителей противника на самолетах «ФВ-190». Ситуация сложилась так, что в воздушном бою капитан П. И. Павлов был вынужден в одиночку противостоять трем истребителям противника, при этом одного из них он сбил, что позволило бомбардировщикам успешно выполнить боевую задачу [9].

За проявленное мужество и героизм в боях с врагом в июле 1944 года ему было присвоено звание Героя Советского Союза.

Командир авиационной эскадрильи капитан Б. М. Сушкин принимал участие в Великой Отечественной войне с июня 1941 года. В многочисленных воздушных боях с врагом показал себя грамотным и храбрым летчиком, всегда надежно прикрывающим сопровождаемые самолеты.

25 мая 1943 года три истребителя полка, ведомые капитаном Б. М. Сушкиным, сопровождали самолеты «Пе-2» для нанесения бомбового удара по железнодорожному мосту у города Нарва. У цели наши самолеты были встречены сильным огнем зенитной артиллерии и шестью истребителями противника «ФВ-190». Однако тройка наших истребителей, не допустив самолеты противника, дала возможность бомбардировщикам «Пе-2» сбросить бомбы точно по цели. Два летчика-истребителя полка ценой собственной жизни прикрыли пикировщиков. Капитан Б. М. Сушкин остался один прикрывать наших пикировщиков и продолжал вести бой с четырьмя «ФВ-190». Он честно выполнил задание и привел «Пе-2» на свой аэродром, не потеряв ни одного своего самолета при атаках истребителей противника.

25 июня 1943 года капитан Б. М. Сушкин возглавлял четверку истребителей полка, перед которой была поставлена задача – сопровождение самолетов «Пе-2». В районе цели наши самолеты были атакованы численно превосходящим противником. В неравном бою были подбиты два наших истребителя. Капитан Б. М. Сушкин в паре со своим ведомым продолжал бой с истребителями, надежно прикрывая наших пикировщиков. В бою Б. М. Сушкин сбил вражеский самолет и дал возможность бомбардировщикам успешно выполнить задание, а также без потерь привел их на свой аэродром [9].

Летчик, командир звена лейтенант Н. Г. Антонов принимал участие в Великой Отечественной войне с июня 1943 года. Во время одного из боевых вылетов на выполнение задания по прикрытию бомбардировщиков он заметил самолет противника «ФВ-190», предпринимавший попытки атаковать подбитый самолет «Пе-2». Смело ринулся Н. Г. Антонов в бой, отразил атаки противника и, прикрывая подбитый самолет, благополучно привел его на свой аэродром.

16 сентября 1944 года, вылетев во главе звена на сопровождение самолетов «Пе-2» на территорию противника, Н. Г. Антонов принял бой с истребителями «ФВ-190». В этом бою он сбил два «ФВ-190» и сам погиб смертью героя. Летный состав части потерял замечательного друга и прекрасного мастера воздушного боя. Всех поражала его беспредельная храбрость и готовность рисковать собой ради выполнения боевой задачи [10].

Летчик капитан Д. И. Зосимов отличался храбростью и мужеством, он всегда искал боя с врагом и всегда выходил из него победителем. Об этом свидетельствуют некоторые эпизоды из его боевой деятельности.

В июне 1941 года, выполняя в паре задачу по разведке в районе озера Самро, на обратном маршруте на высоте 2000 метров капитан Д. И. Зосимов обнаружил два бомбардировщика противника «Ю-88», которые пытались бомбить наши войска. «Во что бы то ни стало не допустить бомбардировку наших войск» – принял решение капитан Д. И. Зосимов. Пошел в лобовую атаку на самолет врага, затем произвел еще ряд атак, заставив его сбросить бомбы до цели. Израсходовав весь боезапас, на высоте 400 метров Д. И. Зосимов пошел на встречный таран, отрубил плоскость «Ю-88», в результате чего тот врезался в землю. Капитан Д. И. Зосимов получил тяжелые ранения, но сумел произвести посадку на свой аэродром.

2 августа 1942 года капитану Д. И. Зосимову командующий Краснознаменным Балтийским флотом адмирал В. Ф. Трибуц поручил ответственное задание – проследить место посадки бомбардировщиков противника, которые бомбили наши войска. При попытке увязаться в хвост бомбардировщика капитан Д. И. Зосимов со своим напарником были замечены истребителями противника. Восемь истребителей «Ме-109» атаковали двух советских летчиков. Капитан Д. И. Зосимов со своим напарником смело вступили в бой. Вскоре ведомый Д. И. Зосимова был подбит и вышел из строя. Капитан Д. И. Зосимов продолжал мужественно драться один против восьми фашистских стервятников. Около 20 минут продолжался этот героический неравный бой, однако он все же смог благополучно возвратиться на свой аэродром.

11 сентября 1942 года, прикрывая наземные войска, капитан Д. И. Зосимов один встретил три самолета врага «Ме-109» и смело вступил в бой. На глазах у летчиков 21-го Гвардейского полка капитан Д. И. Зосимов сбил одного стервятника, но тут же сам попал под удар: его самолет загорелся, сам он был тяжело ранен осколком в ногу. Несмотря на сильные ожоги лица и боль в ноге, он сумел довести горящий самолет до своей территории и благополучно посадить его на свой аэродром. В тяжелом состоянии его отправили в госпиталь.

Младший лейтенант И. Чернышенко – самый молодой летчик полка. Ему едва исполнилось 20 лет, но он уже на своем боевом счету имел пять фашистских самолетов, сбитых им лично. Прекрасный друг и воин, он пользовался большой любовью у всего личного состава полка. Смелый и мужественный, он всегда искал боя, питал огромную ненависть к врагу и умело мстил ему. 22 мая 1943 года четыре летчика полка на самолетах «Як-7», ведущим которых был капитан В. М. Сушкин, прикрывали шесть «Пе-2», наносивших бомбовый удар

по железнодорожному мосту через реку Нарва. Задание было выполнено блестяще. При отходе от цели наши самолеты были атакованы шестью истребителями противника «ФВ-190», наших истребителей в бой вступило трое. Вскоре фашистам удалось сбить один самолет. Бой против шести фашистских самолетов продолжали вести два летчика, капитан В. М. Сушкин и младший лейтенант И. Чернышенко.

Фашисты рвались к самолетам «Пе-2». В тот момент, когда одному из пикировщиков грозила неминуемая смерть, Иван Чернышенко подставил себя и свой самолет под смертельную очередь фашиста. Сам погиб, но пикировщика спас. Летчики полка поклялись жестоко мстить за смерть боевого друга и эту клятву свято выполняли. После Ленинградской битвы на боевом счету полка было 252 сбитых фашистских стервятника [11].

В боевых успехах учеников-подчиненных была огромная заслуга Павла Ивановича Павлова, который обучал и воспитывал их, являясь командиром эскадрильи, заместителем командира полка, а затем и командиром полка. Такие качества, как верность Родине, мужество, героизм, отвага, воля к победе, самопожертвование, воспитанные у П. И. Павлова в Военно-теоретической школе Красного воздушного флота, он успешно прививал своим ученикам.

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 5 ноября 1944 года за отвагу и проявленный героизм подполковнику Павлову Павлу Ивановичу было присвоено звание Героя Советского Союза с вручением ордена Ленина и медали «Золотая Звезда». К 9 мая 1945 года он произвел около 500 успешных боевых вылетов, в воздушных боях сбил 12 вражеских самолетов лично и пять – в группе [12].

После Великой Отечественной войны Павел Иванович окончил Военно-морскую академию им. К. Е. Ворошилова и командовал авиационными соединениями. С марта 1956 года генерал-майор авиации П. И. Павлов в запасе. За годы Великой Отечественной войны и в послевоенный период Герой Советского Союза П. И. Павлов был награжден тремя орденами Ленина, четырьмя орденами Красного Знамени, орденом Ушакова 2-й степени, орденом Красной Звезды, медалями «За боевые заслуги», «За оборону Ленинграда», другими медалями СССР, иностранными орденами и медалями. Умер 2 февраля 1967 года. Похоронен на Серафимовском кладбище Ленинграда [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мужество, храбрость, верность Родине, самопожертвование, отвага, воля к победе, воспитанные Павловым Павлом Ивановичем в годы Великой Отечественной войны и в послевоенный период, традиционно передаются из поколения в поколение, то есть реализуются в живой связи времен. Благодаря этим качествам его ученики, а также ученики его учеников совершали и продолжают совершать подвиги на службе Отечеству, о чем свидетельствуют боевые дела российских летчиков в ходе специальной военной операции на Украине.

Список использованных источников

1. *Конорев В. В, Белянкина В. Ю., Бурлаков В. В.* Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского: Исторические предшественники – СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2012. – 277 с.

2. Филиал ЦАМО РФ. – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 1. – Л. 279.

3. Там же. – Л. 250.

4. Советские соколы. Зеркало истории : [сайт] // ВКонтакте. – URL: https://vk.com/wall-57819359_185262 (дата обращения: 07.12.2025).

5. Филиал ЦАМО РФ. – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 1. – Л. 250.

6. Там же. – Л. 251.

7. Там же. – Л. 252.
8. Там же. – Л. 254.
9. Там же. – Л. 255.
10. Филиал ЦАМО РФ. – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 1. – Л. 256.
11. Там же. – Л. 257.
12. Павлов Павел Иванович // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Павлов,_Павел_Иванович (дата обращения: 05.12.2025)
13. Филиал ЦАМО РФ. – Ф. 596. – Оп. 11. – Д. 1. – Л. 249.

В. П. Огородников
доктор философских наук, профессор

ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ И ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В статье раскрывается связь онтологических и гносеологических проблем искусственного и естественного интеллектов. На этом основании показано существенное различие их сущности и функций. Производится сравнительный анализ слабой и сильной гипотез искусственного интеллекта, символической и коннекционистской парадигм искусственного интеллекта. Демонстрируется связь философских проблем искусственного интеллекта с теорией отражения и с проблемой критерия истины.

Ключевые слова: онтология и гносеология естественного и искусственного интеллектов, отражение и познание, слабая и сильная гипотезы искусственного интеллекта, символическая и коннекционистская парадигмы искусственного интеллекта, истина в работе искусственного интеллекта.

Всего за несколько десятилетий искусственный интеллект превратился из полуфантастической концепции в самую распространенную и влиятельную мировую технологию, которая используется буквально во всех сферах человеческой деятельности – от материального производства до художественного творчества. Но осмысление сущности того, что уже существует, как всегда отстает от объективной реальности. Поэтому до сих пор не существует достаточно адекватного определения искусственного интеллекта, не определены главные отличия искусственного интеллекта от естественного интеллекта, не ясны перспективы развития искусственного интеллекта.

Философские проблемы искусственного интеллекта можно классифицировать по основным разделам философии – онтологии, гносеологии (эпистемологии), логики, этики, эстетики, философии общества и их составляющим. Однако такое рассмотрение потребовало бы создания текста колоссального объема, поэтому в данной статье мы остановимся лишь на онтологических и гносеологических проблемах искусственного интеллекта. Решение этих проблем является прерогативой философии как основы единого научного мировоззрения и всеобщей методологии научного познания. Это определяется и тем, что вопрос о сущности сознания, естественного интеллекта, его генеалогии и взаимодействия с объективной реальностью представляет собой основной вопрос философии.

Онтологические проблемы искусственного интеллекта неразрывно связаны с вопросами о сущности сознания, естественного интеллекта. Такие вопросы не только актуальны, но приобретают в наше время все большую остроту в связи с реанимацией давно уже, казалось бы, устаревших и весьма аргументированно отвергнутых наукой и практикой человеческой деятельности представлений о происхождении *homo sapiens* и сознания. К ним относятся как объективно- и субъективно-идеалистические, так и вульгарно-материалистические взгляды на природу и источник сознания.

Подобные «реанимации», независимо от соображений того, кто является автором и пропагандистом таких взглядов, объективно способствуют появлению мировоззренческой сумятицы. Интересно, что названные противоположные взгляды одинаково несовместимы с самой идеей искусственного интеллекта и самим этим понятием. Если естественный интеллект имеет сверхъестественное происхождение, то рукотворный интеллект не есть интеллект вовсе. Если же предположить, что сознание – продукт взаимодействия нейронов головного мозга человека, то субстрат искусственного интеллекта имеет совсем другую природу. Кроме того, множество реальных случаев показывает, что отдельно взятый мозг, даже функционирующий в организме вполне здорового человека, вне социума не начинает мыслить или прекращает мыслить. Эволюция же искусственного интеллекта происходит без непосредственного включения в этот процесс общественного бытия как необходимого условия.

Следует особо отметить, что автор придерживается классической интерпретации понятия «онтология» и потому не включает в его содержание «идеальное бытие» и «истину». Такое включение, которого в XX и XXI веках придерживались многие западные философы, приводит к полисемии понятия «бытие», делает неразличимым онтологию и гносеологию, делает невозможным различение естественного и искусственного интеллектов.

Онтологические проблемы искусственного интеллекта связаны с сущностью искусственного интеллекта, его онтологическим статусом, что требует определить понятие «искусственный интеллект». Однако это невозможно сделать, не определив коренного понятия «интеллект». Чаще всего интеллект определяют как способность к познанию, осуществляемому в единстве чувственной (ощущение, восприятие, представление) и рациональной (понятие, суждение, умозаключение) сторон, возможность понимать абстрактные понятия и оперировать ими, а также использовать знания для управления окружающей средой [1]. Такое определение отождествляет интеллект с сознанием и мышлением. Хотя мышление – высший «этаж» сознания и эволюционно вырастает из ощущения, восприятия и представления. Как показала подвижническая деятельность выдающегося советского психолога-дефектолога А. И. Мещерякова (1923–1974), связанная со слепоглухонемыми детьми, в отсутствие основных источников информации – зрения и слуха, без специального обучения с опорой на почти единственный канал связи с внешним миром – тактильные ощущения, интеллект не развивается [2].

Широко распространенное определение интеллекта как способности к мышлению, а мышления – как реализации этой способности является тавтологическим. Сегодня генетиками окончательно доказано: все способности человека в основном определяются геномом, в том числе и способности к мышлению. Вместе с тем многочисленные реальные случаи воспитания детей животными показали, что полноценный интеллект у них не развивается и *Homo sapiens* они не становятся. В общефилософском плане возможность, не получившая благоприятных условий внешней среды, элиминирует, исчезает как возможность. Это касается эволюции всей природы – неживой, живой и социально организованной. Для ребенка благоприятные условия внешней среды – это нахождение и совместная деятельность в человеческом сообществе всю свою жизнь. Меняется характер деятельности – меняется человек.

Отсюда вывод: нельзя абсолютизировать ни биологический субстрат сознания, ни социальный фактор его становления – антропосоциогенез диалектически их объединяет.

В большинстве современных словарей интеллект отождествляется с рассудком – способностью логически мыслить, рассуждать. В Новой философской энциклопедии интеллект определяется как способность мыслить и указывается, что гносеологически интеллект обозначает способность к абстрактному познанию, что не присуще чувственному и интуитивному познанию [3, с. 127]. Присоединяясь к этой позиции, отметим, что интеллект относится к логике сознания – к мышлению и, следовательно, связан с понятием, суждением и умозаключением как логическими формами познания. Поэтому и искусственный интеллект не может претендовать на моделирование всего сознания, а более или менее адекватно воспроизводит только мыслительные процессы. С нашей точки зрения, мышление – это отражение в абстрактно-субъективном (в понятиях, суждениях, умозаключениях) сущности конкретно-объективных вещей, их свойств и отношений в окружающем человека мире, в связи человека и мира, во взаимодействии людей. Такое определение раскрывает принципиальное различие, с одной стороны, между интеллектом и сознанием, а с другой – между искусственным интеллектом и искусственным сознанием. Искусственный интеллект программируется, получает информацию и общается с естественным интеллектом на языке символов, представляющим собой предельную степень формализации аристотелевской логики.

Человеческая устная и письменная речь является системой знаков-символов, которые ничего не отражают ни в объективной, ни в субъективной реальности. Аргументом этому суждению служит тот простой факт, что одно и то же понятие на разных языках фиксируется разными словами.

Важнейшим этапом в понимании сущности интеллекта вообще и ИИ в частности является выяснение того, каков источник информации, которой оперирует интеллект. В истории философии и науки выдвигались ранее и рассматриваются сейчас весьма различные и даже противоположные точки зрения на эту проблему. Наиболее распространенные и пользующиеся до сих пор популярностью позиции по этому вопросу неразрывно связаны с главным мировоззренческим и гносеологическим вопросом о первичности во взаимодействии материального и идеального. Первый аспект первичности – онтолого-генетический – формулируется как вопрос о том, что чем порождено – материя ли в результате своего естественного развития пришла к уровню сознания и самосознания, или, напротив, некоторое сверхъестественное (не человеческое) идеальное породило весь материальный мир, включая и человека с его сознанием. По этому первому аспекту первичности мировоззрение разделяется на диалектико-материалистическое и объективно-идеалистическое. Второй аспект первичности – функциональный, связанный с представлением о том, что является детерминирующим, а что – детерминируемым во взаимодействии материального и идеального. По этому аспекту различаются опять же материализм (но не всегда диалектический) и субъективный идеализм.

Итак, если мы стоим на позициях материализма, то исходным и основным источником истинного знания (а неистинное знание не есть вовсе знание) является объективная реальность. Понятно, что люди часто, а машина практически всегда, используют в качестве источника то, что является фиксацией отраженной информации об объективной или субъективной реальности – тексты, изображения, парадигмы, алгоритмы и тому подобное. Однако всё это не является продуктами непосредственного отражения чего-либо, это – знаковая система, фиксирующая результаты отражения.

С позиций объективного идеализма, наиболее распространенная форма которого – религия, источником всякой информации о мире является сверхъестественное идеальное начало. Это – либо припоминание бессмертной души о мире чистых сущностей [Платон (428–348 гг. до н. э.)], либо прямое откровение божества [Ф. Аквинский (1225–1274)], либо врожденные идеи [Р. Декарт (1596–1650)]. Понятно, что ни один из обозначенных вариантов не может рассматриваться в качестве источника информации для искусственного интеллекта.

Субъективный идеализм в начале его возникновения рассматривал в качестве источника информации непосредственные ощущения и их комплексы – восприятия [Дж. Беркли (168–1753)]. Данный взгляд пытались закрепить в своем принципе «верификации» представители «Венского философского кружка» в 20-е–30-е годы XX столетия. В основном, что симптоматично, это были математики и физики: М. Шлик (1882–1936), Л. Витгенштейн (1889–1951), Р. Карнап (1891–1970), К. Гедель (1906–1978). Сторонники принципа верификации предлагали свести все научные высказывания к так называемым «протокольным» суждениям, которые могут быть проверены на истинность путем сопоставления с непосредственными чувственными данными. Но вскоре такой эмпиризм, доведенный до сенсуализма, был опровергнут самими авторами, которые поняли, что все высказывания о прошлом и будущем не могут быть верифицированы. Тогда Р. Карнап предложил совместить принцип верификации с математикой и логикой. Вместе с тем критерием истинности суждения становилась его логическая непротиворечивость в отношении других суждений в рамках данной концепции.

Так субъективный идеализм перешел от абсолютизации субъективно-чувственного к абсолютизации субъективно-рационального, что ознаменовало становление логического позитивизма. Логический позитивизм отождествляет логичность и истинность суждения. Однако в истории науки весьма часто встречались противоположные концепции, одинаково логично изложенные. Наиболее ярким примером сказанного является противоположность геоцентрической системы К. Птолемея и гелиоцентрической концепции Н. Коперника.

В начале XX века рационалистический субъективный идеализм нашел свое выражение и в форме конвенционализма, предложенного выдающимся французским математиком и физиком философом А. Пуанкаре (1854–1912), как решение проблемы несовместимости стихийного материализма естествоиспытателей с открытием микромира. Элементарные части-

цы не соответствовали философским представлениям о том, что критерием материального является данность непосредственным ощущениям человека. А. Пуанкаре выдвинул идею о том, что электрон и другие элементарные частицы не являются чем-то материальным, а являются результатом конвенции – соглашения между физиками, закрепленного в формуле. По точному комментарию к этой идее В. И. Ленина «материя исчезла, остались одни уравнения» [4, с. 326]. Отец квантовой механики В. Гейзенберг (1901–1976) в начале своей научной карьеры также поддался идее конвенционализма и утверждал, что электрон – не более чем химера нашего разума.

Как показала обширная научно-экспериментальная практика XX столетия, и объективный идеализм и субъективный во всех их вариациях оказываются тупиковыми методами для процесса поиска сущности как искусственного, так и естественного интеллекта [5–8]. Напротив, позитивные результаты в этом поиске дает только рассмотрение процесса познания и формирования сознания, развития интеллекта при использовании диалектико-материалистической теории отражения.

Теория отражения раскрывает связь онтологической и гносеологической проблематики в рассмотрении генезиса и сущности интеллекта.

С точки зрения диалектического материализма отражение – атрибутивное свойство материи, характеризующееся переносом структуры одной системы в другую систему в процессе их взаимодействия.

Развитие свойства отражения определяется эволюцией объективной реальности – от неживого к живому и, наконец, социально организованному. Отражение лежит в фундаменте эволюции материального мира. Так как фундаментальным атрибутом материи является движение, то проследить сопряженную эволюцию материи и форм отражения можно путем анализа эволюции форм движения и взаимодействия – от механической (перенос пространственной структуры), физической, химической, биологической (раздражимость, ощущение, восприятие, представление) к социальной форме (понятие, суждение, умозаключение).

Различные формы отражения не только строго субординированы в отношении друг друга, но и неразрывно связаны: высшее возникает только на основе низшего и включает в себя это низшее в преобразованном виде. Поэтому высшие и низшие уровни организации материи постоянно взаимодействуют друг с другом через перенос структурной организации. При формировании понятий сознание человека оперирует представлениями и поднимается до высшего уровня абстракции, сохраняющегося во всех последующих формах мысли.

В эволюции форм отражения языку нет места именно потому, что он ничего не отражает. Мышление, как оперирование понятиями, а не словами, является высшей из известных форм отражения. Слово – только знак, символ понятия. Оно связано со знаковой ситуацией, включающей условную связь (осуществляющуюся только в сознании людей) между обозначаемым (моментом объективной или субъективной реальности) и знаком, представленным любым моментом объективней реальности – звуком, рисунком, буквой, словом, иероглифом.

В машинном языке искусственного интеллекта фиксируется связь не между понятием и знаком, а между знаком-словом естественного языка и кодирующим его в двоичном коде знаком искусственного языка. Элемент искусственного языка представляет собой символ символа – метасимвол. В этом ярко проявляется принципиальное различие естественного и искусственного интеллектов. Первый оперирует символами понятий, второй символами символов понятий. Если язык человека по И. П. Павлову – вторая сигнальная система, то искусственный язык может быть определен в этом контексте как «третья сигнальная система».

Особенно важно то, что в связи со сказанным выше искусственный интеллект не может выступать даже в качестве модели мышления. Кроме того, это рассмотрение ставит под сомнение как «слабую», так и «сильную» гипотезы искусственного интеллекта, конкурирующие до сих пор между собой.

Гипотеза «слабого искусственного интеллекта» связана с мнением, что машины, возможно, обладают способностью действовать интеллектуально. С этой гипотезой корреспон-

дируется парадигма символического искусственного интеллекта (логический подход). Такая парадигма сводится к тому, что интеллект (как естественный, так и искусственный) можно свести к манипуляции символами (словами, понятиями) по строгим формальным правилам логики. При этом логические процедуры сводятся к дедуцированию – на вход машины подается задание в виде общих суждений-постулатов, из которых нужно вывести следствие – частные или единичные суждения о конкретном.

Всякий искусственный интеллект работает на основе математической логики. Ввод информации в искусственный интеллект и ее переработка осуществляются на формально-логическом уровне и формально-логическими методами, поэтому на «выходе» искусственного интеллекта мы имеем дело с правильным логическим выводом. Однако цель познания человека – новый закон, принцип, который может быть получен только индуктивным путем, в то время как целью «интеллектуальной деятельности» искусственного интеллекта является получение правильного ответа или результата, найти истину – не его задача.

Гипотеза «сильного искусственного интеллекта» выражается в утверждении, что машины действительно мыслят (а не просто имитируют мыслительные процессы). При этом используется парадигма коннекционизма, которая предлагает рассматривать структуру искусственного интеллекта как адекватную модель человеческого мозга – как нейронные сети. Искусственный интеллект возникает в результате взаимодействия большого числа простых процессоров (нейронов), связанных между собой подобно нейронным связям в мозгу человека. Однако человеческий мозг вне тела, вне органов чувств, вне социальной деятельности не мыслит, а мышление нельзя свести к логическим операциям.

Искусственный интеллект не мыслит – он вычисляет. По скорости вычислений и создания комбинаций искусственный интеллект несоизмеримо перегнал человека. Главный показатель производительности искусственного интеллекта как техники – скорость вычислений. Но это отнюдь не показатель большей или меньшей «интеллектуальности». Компьютер не потому обыгрывает гроссмейстера в шахматы, что он «интеллектуальнее», а потому, что он с большей скоростью производит расчеты возможных ходов с обеих сторон.

Сегодня нейронные сети являются незаменимыми помощниками во всех сферах человеческой деятельности, включая военное дело. Искусственный интеллект «угрожает» заменить человека. Однако «деятельность» нейронных сетей сводится к логическим операциям и вычислениям, а настоящими творцами, открывателями нового они пока не стали. Все дело в том, что новое связано с открытием истины, а искусственный интеллект занят распознаванием, узнаванием и выполнением задания (в основном на дедуктивные умозаключения). При этом на вход подается некое общее положение, а на выходе получается вполне логичное (но не обязательно истинное) заключение относительно конкретных моментов объективной или субъективной реальности. Еще Ф. Бэкон (1561–1626) указывал, что дедуктивный вывод не дает нового и потому наука должна пользоваться прежде всего индукцией. Известна шутка о том, что искусственный интеллект за истину не отвечает: «Компьютер – как мельница, что засыплешь, то и получишь. Если на входе чушь, то на выходе — чушь в квадрате».

Практически все определения искусственного интеллекта отождествляют интеллектуальную деятельность с решением логических задач, и на этом основании «доказывается» сущностное единство искусственного и естественного интеллектов. В книге «Искусственный интеллект: современный подход» авторы определяют искусственный интеллект как «науку об агентах, которые получают результаты актов восприятия из своей среды и выполняют действия, причем каждый такой агент реализует функцию, которая отображает последовательности актов восприятия в действия» [9, с. 24]. Это определение является инструментальным, то есть отвечает на вопрос «для чего это?» вместо ответа на вопрос «что это?» и поэтому не раскрывает сущности ни естественного, ни искусственного интеллекта. Кроме того, тут присутствует отождествление, с одной стороны, сознания и мышления, а с другой – логичности и истинности. Так, онтологические и гносеологические проблемы искусственного интеллекта оказываются тесно связанными. Эти проблемы смыкаются и при решении вопроса

о принципиальном различии искусственного и естественного интеллектов. Отец теории информатики и концепции искусственного интеллекта А. Тьюринг (1912–1954) предложил знаменитый тест различения естественного и искусственного интеллектов: нужно за пять минут при помощи вопросов определить, кто с тобой ведет беседу – машина или человек. Сегодня даже средний искусственный интеллект способен «обмануть» хорошо образованного человека.

Представляется, что различие машины и человека можно определить по другим параметрам. У человека рационально-мыслительная сторона сознания неразрывно связана и вытекает из чувственно-эмоционального основания. Человек разумный возник на Земле благодаря процессу антропосоциогенеза, соединившего биологические и социальные факторы, прежде всего созидательный совместный труд. Это и было появлением сознания, естественного интеллекта.

Генеалогия того, что сейчас называется «искусственным интеллектом», совсем иная, чем генеалогия *homo sapiens*. Техника вычислений и исчислений появилась еще до математики. Первой такой техникой, помогающей человеку производить простейшие арифметические вычисления, были, наверное, камешки, а затем счетные палочки, счеты, логарифмические линейки, арифмометр, калькулятор, ЭВМ и наконец компьютер. Общность всех этих устройств в том, что они являются вычислительной техникой, производят количественный анализ по определенным алгоритмам. Это составляет и онтологическую и вместе с тем гносеологическую сущность искусственного интеллекта. «Познание» искусственного интеллекта сводится к узнаванию, распознаванию и составлению по заданной программе комбинаций информационных битов.

Существенным различием естественного и искусственного интеллектов является неспособность искусственного интеллекта к творчеству, открытию принципиально нового, закона. Программа деятельности искусственного интеллекта представляет собой набор стандартных алгоритмов, на основе которого он производит решение системы линейных алгебраических уравнений, численное интегрирование дифференциальных уравнений и тому подобные операции.

То, что называется «искусственным интеллектом», сегодня успешно пишет стихи, рисует картины, сочиняет музыку и даже диссертации по любой проблематике… Но тестирование этих произведений показывает, что они не содержат ничего принципиально нового и являются более или менее успешными компиляциями.

Если искусственный интеллект не мыслит, а является инструментом мышления – оперирует знаковыми системами, то ставить вопрос об истинности результатов этих операций не корректно. В отношении них можно говорить лишь о логической правильности или неправильности.

Сегодня большинство исследователей феномена искусственного интеллекта приходят к выводу, что генеративный искусственный интеллект переоценен как универсальный инструмент и неправомерно возведен в ранг мыслящего существа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог краткому исследованию сущности искусственного интеллекта, отметим его существенные, на наш взгляд, характеристики. Всякий искусственный интеллект работает на основе математической логики. Ввод информации в искусственный интеллект и ее переработка осуществляются на формально-логическом уровне и формально-логическими методами. Цель познания человека – открыть новый закон, принцип, целью «интеллектуальной деятельности» искусственного интеллекта является получение правильного ответа или результата, найти истину – не его задача. Поскольку машины – формальные системы, ограниченные в силу теоремы К. Гёделя (1906–1978) о неполноте [10, с. 57], то они не способны

установить истинность относящегося к ним самим суждения. Используемый искусственным интеллектом машинный язык символической логики фиксирует связь не между понятием и знаком, а между знаком-словом естественного языка и кодирующего его в двоичном коде знаком искусственного языка. Искусственный интеллект до сих пор выполняет в человеческой деятельности роль инструмента.

В соответствии со сказанным сам термин «искусственный интеллект» следует характеризовать скорее как метафору.

Список использованных источников

1. Encyclopedia Britannica. – URL: https://www.britannica.com/science/human-intelligence-psychology (дата обращения: 17.02.2026).

2. *Мещеряков А. И.* Слепоглухонемые дети. Развитие психики в процессе формирования поведения. – М. : Педагогика, 1974. – 327 с.

3. Новая философская энциклопедия : в 4 т. / ред. совет: В. С. Степин [и др.]. – М. : Мысль, 2010. – Т. 2. – 634 с.

4. *Ленин В. И.* Материализм и эмпириокритицизм. Критические заметки об одной реакционной философии. – 5-е изд. – М. : ГПИ, 1968. – Т. 18. – 526 с.

5. *Огородников В. П.* Актуальные проблемы философско-методологических оснований квантовой механики // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2024. – Вып. 692. – С. 259–267.

6. *Огородников В. П.* В дурмане субъективного идеализма // Защита и безопасность : военно-полит. журн. – 2017. – № 2 (81). – С. 20–21.

7. *Огородников В. П.* Философская трактовка пространства и времени и проблемы интерпретации парадоксов квантовой механики // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2025. – Вып. 696. – С. 450–458.

8. *Мезенцев В. А.* В тупиках мистики // Электронная библиотека RoyalLib.com. – URL: http //read.newlibrary.ru (дата обращения: 17.02.2026).

9. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход : пер. с англ. – 2-е изд. – М. : изд. дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.

10. *Пиньейро Г.Э.* У интуиции есть своя логика. Гёдель. Теоремы о неполноте : пер. с исп. // Наука. Величайшие теории. – М. : Де Агостини, 2015. – Вып. 17. – С. 23–45.

Н. А. Репях,
кандидат философских наук, доцент;
А. Н. Хрустова

ЧЕЛОВЕК, ВСЕЛЕННАЯ, КОСМОС В ФИЛОСОФСКИХ НАРРАТИВАХ К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО

В статье рассматриваются космофилософские воззрения выдающегося отечественного ученого К. Э. Циолковского – исследователя в области космических полетов и ракетостроения, основоположника современной космонавтики.

Ключевые слова: космическая философия, Космос, Вселенная, Человек, этическая концепция, совершенная жизнь, социальное управление, нравственное преобразование, гносеологические проблемы.

Наиболее емкая и поразительно точная, по мнению авторов статьи, оценка деятельности выдающегося ученого Константина Эдуардовича Циолковского отражена в словах известного отечественного поэта В. Я. Брюсова: «Космизм! Каково! Никто до Циолковского не мыслил такими масштабами, космическими масштабами!.. Уже это одно дает ему право стать в разряд величайших гениев человечества... Поистине только русский ум мог поставить такую грандиозную задачу – заселить человечеством Вселенную!»

Русский ученый и изобретатель Константин Эдуардович Циолковский, основоположник современной космонавтики, родился в 1857 году в селе Ижевском Рязанской губернии в небогатой семье польского дворянина. Его стремлению к звездам не помешали ни бедность, ни глухота, ни изолированность от отечественного научного сообщества.

С ранних лет проявилась страсть К. Э. Циолковского к знаниям, техническим изобретениям и исследованиям. Штудируя физику, математику и астрономию, все свободное время он проводил в библиотеках с единственными верными друзьями – книгами. И до последних дней своей жизни сохранил Константин Эдуардович постоянное стремление к новым знаниям, в первую очередь через самообразование.

К. Э. Циолковский занимался репетиторством, учительствовал в средней школе, преподавал в уездном училище и, получая небольшой, но постоянный гарантированный заработок, почти полностью его тратил на научные опыты и эксперименты.

Отношения К. Э. Циолковского с академическим сообществом были непростыми, хотя первые научные труды получили положительный отклик, и Константин Эдуардович был принят в Русское физико-химическое общество. Почти всю свою жизнь К. Э. Циолковский активно занимался проблемами воздухоплавания, многими реальными практическими вопросами освоения космоса, которые позднее стали теоретической основой отечественного ракетостроения. За особые заслуги в области изобретений, имеющих огромное значение «для экономической мощи и обороны СССР», в 1932 году ученый был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

В целом результаты трудов К. Э. Циолковского в области космонавтики очевидны. Он оставил математические расчеты, необходимые для решения проблем, связанных со строительством многоступенчатых ракет, многие его теоретические разработки выдержали проверку временем. В своих философско-художественных работах К. Э. Циолковский развил «космическую философию», которая опиралась на концепцию «атома» как бессмертного одушевленного элементарного существа, курсирующего от организма к организму во Вселенной, многие философские идеи ученого легли в основу русского космизма.

Константин Эдуардович по праву считается первым теоретиком освоения человеком космического пространства. Российская академия наук награждает ученых и конструкторов, работающих в области космонавтики, золотой медалью имени К. Э. Циолковского «За выдаю-

щиеся работы в области межпланетных сообщений». Его имя носит первый в мире музей космической тематики – Государственный музей истории космонавтики. Сегодня активно развивается один из самых молодых городов России – Циолковский, где живут и самоотверженно трудятся современные покорители космоса – ученые и труженики космодрома Восточный.

Трудность анализа философского наследия К. Э. Циолковского заключается, считают авторы, в сложности использования научной методологии, рационального критического подхода к его космической философии. Изложение взглядов ученого на Человека, Вселенную и Космос опирается не только и даже не столько на научную основу, а на использование художественного, публицистического, а порой религиозного и даже мистического описания. Отметим, что теоретизирования К. Э. Циолковского порой приобретают стиль оторванного от общества одиночки, затворника, пишущего, однако, эмоционально, страстно и харизматично. Этим обстоятельством в значительной степени и предопределен выбор авторами для названия статьи термина «нарратив». На наш взгляд, именно в таком жанре целесообразно представить космофилософские взгляды К. Э. Циолковского. Чаще всего в своих повествованиях он излагает собственную позицию через призму субъективного отношения, личного восприятия и индивидуального осмысления. Отправляя своим друзьям «Очерки о Вселенной», ученый заявляет о необходимости познания Вселенной для составления мировоззрения и руководящего в жизни начала. Определяя основной замысел своих произведений, Циолковский высказывается о желании быть Чеховым в науке, чтобы через небольшие очерки читателям с различной степенью подготовленности дать серьезное логическое познание наиболее достоверного учения о Космосе [1].

Специфика нарративов К. Э. Циолковского и в том, что они не изложены на языке строгих философских понятий и не всегда достаточно систематизированы. В работах ученого встречается причудливый философский эклектический «калейдоскоп» идей, содержащий, к примеру, установки античного эвдемонизма и моральных принципов «разумного эгоизма», ярко выраженное признание идей теософии наряду с увлечением буддийскими и индуистскими установками на реинкарнацию. Парадоксальную антиномичность космической философии К. Э. Циолковского можно заметить и в том, что он порой, даже в рамках одной своей работы, может использовать взаимоисключающие определения, положения. Особенно это ярко представлено, например, в той части учения, которую сам Циолковский называет метафизикой. Возможно, это объясняется и тем, что, как известно, ученый не был профессиональным философом, да и сам не считал себя таковым. Более того, он неоднократно признавался в отсутствии особой склонности к философии в молодости. Называя философию наукой наук, «вершиной научного знания», ученый твердо убежден, что познание философии «не для юных лет». Он писал, что прошел путь к философии, «как и любой мыслитель», через «точные знания».

Нельзя не отметить и значительную эволюцию философских взглядов мыслителя. Так, перечитывая в 1928 году свою работу «Этика, или естественные основы нравственности», он делает важное замечание: мол, в написанном отразился ход его мыслей 1903 года. И заявляет по этому поводу следующее: «Теперь я ушел вперед» [2].

Отметим интересную деталь: К. Э. Циолковский считал, что благодаря первоначальному равнодушию к философии ему якобы удалось избежать использования распространенных терминов философии, довольствуясь общенаучными и менее чуждыми большинству. Однако авторы убеждены в том, что К. Э. Циолковский относился к философии как к образу жизни. И жил он так, как писал, и глубоко верил в это. Действительно, ученый всегда был искренен в своих трудах независимо от любых внешних обстоятельств. В письме «Моим друзьям» К. Э. Циолковский писал, что ему уже 75 лет и кроме горечи ждать от жизни нечего, а значит, нет интереса быть пристрастным [1].

Особенность исследования космофилософских идей К. Э. Циолковского состоит еще и в том, что сложно не только применить методологию научного познания, но не всегда воз-

можно оценить и его аргументацию, верифицировать выводы. Сам ученый считал, что его философию трудно «связать с другими». Он писал, что все философские системы кажутся ему странными и их терминология ненужной [1]. Вместе с тем, авторы убеждены, что своим главным достижением Константин Эдуардович считал именно свою космическую философию, а исследования в области космических полетов и ракетостроения прикладной частью идей об «океане счастья», которым наполнена Вселенная [1].

Философия, по мнению К. Э. Циолковского, состоит из метафизики, гносеологии и этики. Причем первые две части в определенной степени второстепенны, они якобы «служат подготовкой для этики». Для авторов статьи особый интерес представляет решение ученым онтологических проблем, связанных главным образом с исследованием сущности Космоса, его первоначал. В своей работе «Этика, или естественные основы нравственности» К. Э. Циолковский называет свою философию «чистейшим материализмом» [1]. И здесь же мы находим в его этике сосредоточенность на соединении психического атомизма с теизмом, поскольку, как полагает ученый, все имеет причину. Философов, признающих существование единого первоначала, он называет монистами (материального – материалистами, а духовного – спиритуалистами), а их учение – монизмом. Тех, кто утверждает, что материальное и духовное начала смешаны, К. Э. Циолковский называет дуалистами.

Проблемы первопричин мира мыслитель называет телеологическими и указывает на существующие варианты их решения. В конце концов, собственно свою позицию он формулирует как соединение «панпсихического атомизма с теизмом».

Этическая концепция, по собственной оценке К. Э. Циолковского, является ядром всей его космической философии. В Космосе, пишет он, существует совершенная жизнь. Исключением является Земля или зарождающиеся миры, где жизнь несовершенная, хотя она и составляет небольшой процент всеобщей космической гармонии. Как все превратить в совершенство, как преодолеть земные невзгоды? К. Э. Циолковский описывает целую программу действий, предполагающую следующее.

Как и большинство космистов, К. Э. Циолковский является сторонником эволюционизма [2]. Он убежден в необходимости и возможности космической экспансии и освоения Космоса. Вселенная безгранична, она жива, утверждает ученый. Этот материальный мир важно постигать, основательно исследовать, пользоваться его благами, как и благами Земли. К. Э. Циолковский пишет о возможности техники будущего преодолеть земную тяжесть, что позволит путешествовать по Солнечной системе, посетить все ее планеты, получить новые знания о них. Несовершенные миры ликвидируют и заменят собственным населением, окружат Солнце искусственными жилищами, заимствуя материал от астероидов, планет и их спутников. Это даст возможность существовать населению в два миллиарда раз более многочисленному, чем население Земли. Конечная цель космической экспансии, как полагает ученый, заключается в духовном и физическом развитии человечества, и только так можно представлять его будущее [3]. Преобразование Космоса у К. Э. Циолковского, таким образом, это не просто его колонизация, а нравственное развитие и совершенствование.

Признание существования жизни во Вселенной сопровождается размышлениями ученого о степени ее совершенства и «разумности» на разных планетах. Он приходит к выводу, что большинство крупных планет, точнее планет с газовыми оболочками, будет обитаемо или уже обитаемо [1]. В пользу такого вывода К. Э. Циолковский выдвигает аргумент, что большинство планет «солнечных систем», включая Землю, не только состоят из веществ одинаковой природы, а также имеют атмосферу и моря, освещаются солнечными лучами, они испытывают влияние силы тяжести, подвержены смене суток и времен года.

Сущность космоса в зачатке жива, как пишет ученый, способна не только чувствовать радость и страдание, но и мыслить, оценивать, представлять и действовать, принимая сложные органические формы [3]. Особый интерес у К. Э. Циолковского вызывает осмысление степени совершенства жизни на разных планетах и особенно на Земле. Во-первых, в «слабом», даже примитивном виде на планетах Солнечной системы, как полагает ученый, возможно

наличие жизни. На Земле при этом по сравнению с ними более благоприятный температурный режим и «условия вещества». В отличие от других обитаемых планет, пишет К. Э. Циолковский, Земля находится в состоянии развития и впереди у нее значительный прогресс «тела, ума, нравственности, познания и технического могущества» [1]. Однако вряд ли на нашей планете наиболее совершенная жизнь. В равной степени можно говорить о распространении во Вселенной как жизни несовершенной, неразумной, так и в высшей степени разумной.

А, во-вторых, считает К. Э. Циолковский, и млечные пути и спиральные туманности содержат миллиарды Солнц, имеющих, в свою очередь, множество планет. И, по крайней мере, не только наша планета имеет жизнь и разум, но миллион миллиардов планет не менее совершенные [3], убежден ученый. Главным аргументом для такого вывода служит, по мнению Циолковского, безграничность Вселенной. И если жители Земли только мечтают о межпланетных полетах, то существует множество планет «на миллиарды старше нас». Эти так называемые К. Э. Циолковским передовые планеты вмешательством своего разума устраняют несовершенство на тех планетах, где это присутствует. Хотя в целом в гармонии Вселенной страдальческая жизнь на таких планетах малозаметна. Ученый пишет, что сумма страданий незаметна в океане счастья всего космоса. Однако еще больше К. Э. Циолковского волнует вопрос: почему высшие планеты не ликвидируют на Земле страдания и несчастную жизнь? И ,отвечая на него, ученый подчеркивает различие всех планет по возрасту. В гармоничном мире наблюдается не только преобладающий прогресс, но и регресс, который преодолевается «молодыми» планетами. Среди них и наша Земля. С горечью пишет К. Э. Циолковский о том пути, который прошла в своем развитии наша планета. Он называет его мучительным, жертвенным. И если судить об этом пути, то Вселенной, приходит к выводу ученый, управляет безумие.

Но почему именно Земля стала «жертвенной»? По мнению К. Э. Циолковского, основной причиной этого стало то, что источником жизни на Земле стало самозарождение, а не заселение, господствующее в космосе. И Земле, считает ученый, выпал жребий страдальческий, но почетный. Ей и лишь немногим планетам выпала доля усовершенствованным жизненным потоком восполнять потерю так называемых «регрессирующих пород Космоса» [3]. Чрезвычайно редко «допускается» самозарождение в космосе, пишет К. Э. Циолковский, поскольку необходимо пополнение «совершенных» или их обновление. Земля, полагает он, находится все еще в младенческом состоянии, и такие очаги жизни в космосе являются редким исключением. Однако если самостоятельное развитие без вмешательства более развитых планет сопряжено со страданиями и мучениями, в будущем оно все же может дать необыкновенные результаты, считает ученый.

А, может быть, у нашей планеты особенная судьба? К. Э. Циолковский пишет, что она одна из избранных высших (ранних) планет и тогда именно от нее должно распространяться по Космосу совершенство. В этом случае и ликвидировать «земное несовершенство» некому. Но, если учитывать, что планет миллиарды, то и избранных планет много. А значит, страданий, сопровождающих рождение в Космосе совершенство, слишком много. Поэтому цель Разума, делает вывод ученый, сокращать страдания, ограничив самозарождение одной планетой, которая будет обеспечивать все бесчисленные планеты Космоса.

Основной смысл космической этики К. Э. Циолковского может быть выражен его страстным призывом к человеку стать Гражданином Вселенной [3]. И не просто Гражданином, а осознающим свою ответственность за эволюцию Космоса, его нравственное преобразование.

Константин Эдуардович предлагает развернутую картину будущего Человечества, изменения его положения в Космосе, места человека в грядущем социуме. Он предлагает обратиться прежде всего к эволюции жизни на Земле, чтобы хотя бы в самом общем виде представить будущее других планет.

Человечество ожидают биллионы лет развития, уверен К. Э. Циолковский, и даже если остынет Солнце, то оно «переселится к другому светилу». Земляне достигнут того же «совершенства, могущества и отсутствия всяких страданий», как и большинство старейших планет [3]. Будущее человеческого общества, положение в нем человека представляются К. Э. Циолковским в целом оптимистично. Общество будет построено, считает он, на социалистических принципах, обеспечивающих объединение народов. Войны уйдут в прошлое, а социальное управление будет осуществляться «знающими и мудрейшими». Управляемое выборным правлением и президентом, совершенным станет и само население, будет один язык и «одинаковое благополучие».

Отмечая гигантский прогресс в науке, технике, социальном устройстве, К. Э. Циолковский вместе с тем указывает на наличие медленных и незначительных перемен в самом человеке. Особенно это заметно, как пишет ученый, в нравственном несовершенстве, указывая на остатки животных инстинктов, наличие страстей, слабость ума и рутинность.

Качественное изменение социального устройства, быстрый рост науки и техники, по мнению ученого, улучшат быт людей. Человек станет полновластным хозяином планеты. В целях удовлетворения своих потребностей он преобразует окружающую среду, сможет изменять климат. Сначала, пишет К. Э. Циолковский, исчезнут вредные растения и дикие, а потом и домашние животные. Растения усовершенствуются искусственным образом, что позволит утилизировать в тысячу раз больше солнечной энергии.

Контрастом в этической концепции К. Э. Циолковского выступает его позиция в отношении семьи, брака и демографических проблем в целом. Население Земли вырастет в тысячу раз, численность людей дойдет до своего предела. Однако право «производить детей», как пишет К. Э. Циолковский, будут иметь только лучшие особи. Изменять качество людей позволит искусственный отбор, и уже через тысячу лет, заявляет ученый, население невозможно будет узнать. Якобы исчезнут низшие инстинкты, даже исчезнут «унижающие нас» половые акты, произойдет замещение искусственным оплодотворением.

В будущем обществе будет определен искусственный подбор родителей. У Циолковского все состоят в браке и живут по любви, однако иметь детей станет привилегией и правом исключительно избранных, которые более здоровы, способны к обильному размножению, склонны к плодотворной деятельности. Регуляция этих процессов осуществляется представителями общества на основе принятых законов.

Жизнь человека станет комфортной, счастливой и радостной, обеспечивающей полную реализацию как индивидуальных потребностей человека, так и его общественных потребностей. Таким образом, будет обеспечено не только совершенствование человеческой природы, но и значительный прирост населения, вплоть до его избытка. На вопрос, как решать демографическую проблему, К. Э. Циолковский отвечает – переселять в околосолнечное пространство. Массовое переселение начнется после «высшего совершенства» Земли и достаточно высокой степени физического и умственного развития людей. К. Э. Циолковский пишет, что прежде чем человек достиг совершенной и счастливой жизни, он прошел «тяжелую школу». И такую «страдальческую» жизнь он не пожелал бы никогда и никому. Ученый заключает, что так было и во всем космосе [3].

Новая этика К. Э. Циолковского включает решение вопросов социального управления. Прежде всего, считает он, необходимо найти в человечестве самого умного и знающего человека, которому все должны беспрекословно подчиняться. Такой человек, которого ученый называет высшим, призван исполнить историческую миссию. Эта миссия будет заключаться в следующем. Он даст людям алфавит, язык, знание. Определит лучшее социальное устройство. В таком обществе будет полностью исключена смертная казнь, так как при этом могут страдать и невинные, исключается любое убийство. Казалось бы, К. Э. Циолковский возводит в абсолют этику ненасилия. Пожертвовать одной личностью, уничтожить, казнить ее даже для спасения всего человечества, как пишет он, ни при каких условиях неприемлемо. К. Э. Циолковский уверен, что любой поступок, даже со слабыми следами зла, должен быть

судим. Изоляция и лишение потомства станут высшим наказанием любого неисполнения закона. Как заявляет ученый, никто и никогда не может быть убит. Однако в работе «Характеристика моих работ по социологии и философии» (январь 1920 г.) К. Э. Циолковский делает жесткое заявление о необходимости «погашения» не только животных, но и большой части «несовершенных человеческих родов» путем ограничения в размножении [3].

Как же тогда бороться с преступниками? Суд и только суд может их изолировать или лишать потомства, считает он. И если у убийцы есть дети, внуки, даже правнуки, то и они все лишаются потомства. При этом К. Э. Циолковский называет лишение потомства не просто «серьезным наказанием», а «скорее облегчением».

Важное место в сфере философских размышлений К. Э. Циолковского занимали гносеологические проблемы. Прежде всего, это вопросы познаваемости мира. Ученый называет существующие, по его мнению, варианты философских интерпретаций. Первый он определяет как реализм, сторонники которого на вопрос «строго ли согласны наши познания со строением Космоса или отличны» утверждали, что наши представления о мире «сходны» с самим миром. Другую крайность К. Э. Циолковский называет идеализмом. Идеалисты, считал он, это те, кто думает, что наше представление о мире вполне субъективно. Но есть еще, по мнению ученого, и философы «средних убеждений». К ним он относит и себя, считая реализм и идеализм крайностями, а истина, убежден ученый, – посредине.

Резкой критике подвергаются ученым люди, которые находятся в плену у суеверий. В работе «Радость смерти» он пишет, что большинство людей невежественно, у них совсем нет научных знаний, или они поверхностны. Это, в свою очередь, влечет преобладание веры в предрассудки [1]. На вопрос, как относиться к таким людям, К. Э. Циолковский отвечает вполне определенно, отмечая их болезненность или сумасшествие. Им необходимо оказывать внимание, милосердие и сожаление. Некоторые же люди, утверждает он, возможно, неизлечимы. Но большинству нужно дать знания, которые избавили бы их от заблуждений и гибели. Нет никаких сомнений в потребности огромных сил и терпения, подчеркивает К. Э. Циолковский, обучая людей, вооружая знаниями, чтобы с благородной целью изменить к лучшему их образ жизни [1].

Значимое место в жизни общества и особенно в решении глобальных проблем, по К. Э. Циолковскому, занимает наука. Более того, с развитием науки он связывает совершенствование и самого человека. Через тысячу лет наука расширится, усовершенствуется, как пишет ученый в работе «Любовь к самому себе, или истинное себялюбие», и сам человек преобразуется к лучшему [1].

К. Э. Циолковский с удовлетворением констатирует, что изучение Вселенной начато, однако оно никогда и не будет закончено, ведь знание – это всего лишь капля, а незнание – целый океан. При этом будущее науки ученый оценивает оптимистично, утверждая о совсем новых и более полных выводах, к которым придут через тысячу или миллионы лет.

Своеобразно решает К. Э. Циолковский проблему истины. Прежде всего, отметим, что он, рассуждая об истине, использует понятия – настоящая, абсолютная, условная, временная, переменная истина.

Настоящей или абсолютной истины, считает К. Э. Циолковский, не существует, так как она основывается на полном и глубоком познании Космоса. Но этого быть не может. Наука, дающая знание, утверждает ученый, непрестанно движется вперед, опровергая или утверждая старое, обретая новое. В разной степени меняется содержание науки, и происходит это каждое новое столетие. К. Э. Циолковский делает из этого вывод, что истина может быть только условной, временной и переменной.

Что же признавать истинным? Религиозные учения, хотя и называют свои догматы истиной, таковыми не являются, считает ученый. Сама вера не может быть истинной. Существует много вер, считает он, которые противоречат друг другу, отвергаются наукой и потому не могут быть приняты за условную истину.

Не могут быть истинами политические убеждения или философские размышления, хотя некоторые философы, отмечает К. Э. Циолковский, для своих выводов и использовали «точное знание».

Авторы статьи не разделяют и точку зрения ученого, когда истиной признаются только те «убеждения», которые приняты, «утверждены всем миром». Сам же К. Э. Циолковский пишет по этому поводу, что условной истиной может быть та, что вырабатывается последовательно от деревни, города, округа до всех наций [3].

Констатируя ситуацию, сложившуюся в современном ему обществе, К. Э. Циолковский заявляет, что человечеством пока на практике овладевает индивидуальная истина. И поэтому именно она часто выступает источником насилия над человечеством. Однако в некоторых случаях такая истина может быть выше планетной, поскольку ее формулирует высший человек – «как пастух управляет стадом, чтобы спасти его от хищников», пишет Циолковский.

В рамках своей гносеологии К. Э. Циолковский предлагает классификацию наук и знаний, накопленных человечеством. К сожалению, сложно определить четкие критерии деления «всего знания, накопленного человечеством». Следует отметить, что ученый группирует эти знания по десяти категориям.

К первой он относит «непосредственные знания», к которым причисляет множество знаний преимущественно эмпирического характера. Далее следует «знание теоретическое, которое можно непосредственно проверить». Третью категорию составляют «знания теоретические, или непосредственные, которые проверить пока нельзя». В качестве примера ученый приводит знания в области астрономии. К четвертой относятся знания несомненные и точные, однако проверить их непосредственно «на наши чувства» не представляется. Например, знания о массе атомов и их расположении в молекулах. Знания вероятные или приблизительные, которые проверить можно, включает пятая категория. (Например, статистические данные.) В шестую категорию ученый включил такие же приблизительные или вероятные знания, которые пока проверить невозможно. Примером ученый называет наличие своих планет у других звезд или живых существ на этих планетах. К седьмой категории у К. Э. Циолковского относится знание, но проверить и утвердить его совсем невозможно. Чаще это случается, считает он, когда прибегают к теории вероятности. Например, чувствуют радость либо горе все люди или животные, или они автоматы? Знания фактические, которые противоречат научным фактам, составляют восьмую категорию. Они являются свидетельством противоречивости формирования нового знания, порой не получившего еще достаточного обоснования и доказательств [3].

Указанные восемь категорий К. Э. Циолковский предлагает считать строго научными, так как они не имеют ничего общего с фантазиями, религиозными доводами и мнениями авторитетов.

«Полузнаниями» ученый называет «предположения и гипотезы». Это девятая категория знаний, которые объясняют лишь некоторые явления, при этом неявно. И наконец, народные предания и предрассудки, большинство исторических сведений и мифы составляют десятую группу. И им каждый человек, убежден ученый, вправе не верить.

Все науки К. Э. Циолковский классифицирует как точные и сомнительные. К точным он относит биологию, геометрию, механику, радиологию, физику, химию, математику или логику. Последней он отводит особое место. В статье «Земная этика» Циолковский пишет об опоре исключительно на математические и естественные науки. Ученый отмечает, что современное знание беспредельно и постоянно развивается, хотя и многое в науке противоречиво и неясно, но на данный момент пока лучшей опоры нет. Кроме этого, точными, однако имеющими прикладной или относительный характер, ученый называет астрономию, ботанику, географию, геологию, зоологию. К «сомнительным» наукам К. Э. Циолковский относил исторические, философские и религиозные. Такое название он объясняет тем, что в них отсутствуют единые «решения задач», а порой и вовсе отсутствуют верные. Однако сомни-

тельные науки очень важны, считает Циолковский, поскольку представляют попытки решить такие задачи, которые крайне существенны каждому сознательному «существу».

Приступая к изучению космической философии «Нового гражданина Вселенной Константина Циолковского» (так иногда представлялся основоположник современной космонавтики), авторы понимали сложность предстоящей задачи. Действительно, невозможно в рамках отдельной статьи представить всю полноту и многообразие идей мыслителя.

Работа над статьей позволила убедиться в масштабности мышления К. Э. Циолковского, проницательности и способности предвидеть будущее нашей планеты, перспектив развития человеческой цивилизации.

Неоценим вклад ученого в развитие науки и техники, особенно в создание теоретических основ космонавтики. Интерес к его творческому наследию не ослабевает. Наряду с опубликованными ранее трудами К. Э. Циолковского, в последние годы впервые изданы систематизированные философские рукописи мыслителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Давая общую оценку космофилософским идеям К. Э. Циолковского, следует признать, что некоторые из них, действительно, принципиально не доказаны либо вызывают серьезные сомнения в истинности, а часть из них опровергается реальной практикой освоения космоса. Однако несомненно и то, что их гуманистический и творческий потенциал актуален. Как и раньше, он обладает жизнеутверждающей силой, выступает стимулом и надеждой для многих миллионов людей. И, как никогда, такой вывод авторов созвучен пламенному призыву Константина Эдуардовича Циолковского: «Все мои многочисленные труды – законченные или незаконченные, изданные и неизданные направлены к одной цели: доказать излагаемые тут мысли и сделать конечный вывод: в общем, космос содержит только радость, довольство, совершенство и истину».

Список использованных источников

1. *Циолковский К.* Космическая философия.– М. : Эксмо, 2025. – 352 с. – (Всемирная литература (с картинкой)).

2. Русский космизм: антология философской мысли / сост.: С. Г. Семенова, А. Г. Гачева; вступ. ст. С. Г. Семеновой; прим. А. Г. Гачевой. – М. : Педагогика-Пресс, 1993. – 368 с.

3. Сборник научно-фантастических и научно-популярных работ К. Циолковского. – М. : Август Борг, 2023. – Т. 3 : Космическая философия. – 308 с.

А. С. Громов;
И. В. Грудинин,
доктор военных наук, профессор;
Б. А. Летучев,
кандидат военных наук;
Д. Г. Майбуров,
доктор военных наук, профессор

ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ КАК ОСНОВА НОВОЙ МОДЕЛИ ВОЕННОГО ИСКУССТВА: РОЛЬ ФОРМИРОВАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК В СОЗДАНИИ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТУРА

Статья констатирует коренную трансформацию теории и практики тактики. Ключевыми факторами изменений выступают всеобщая технологизация поля боя, сетецентрические принципы управления и рост роли информационного противоборства. Авторы подробно исследуют специфику тактики формирований космических войск, чья деятельность принципиально отличается от классических родов войск. В статье обосновывается тезис о размывании границ между тактическим, оперативным и стратегическим уровнями ведения войны. Делается вывод о необходимости пересмотра устоявшейся трехуровневой структуры военного искусства и разработки новой, более гибкой концептуальной модели.

Ключевые слова: военное искусство, тактика, космические войска, интероперабельность, сетецентричность, сетецентрично-голографическая парадигма, сквозные функциональные возможности, уровни ведения войны (тактический, оперативный, стратегический), информационно-функциональный контур, информационное превосходство, управление.

ВВЕДЕНИЕ

Современный характер вооруженной борьбы, проявляющийся через призму опыта последних вооруженных конфликтов, демонстрирует нарастающее системное противоречие: в то время как технологический потенциал вооруженных сил ряда государств достигает небывалых высот, существующая теоретическая база, основанная на трехуровневой структуре военного искусства (стратегия – оперативное искусство – тактика), все чаще становится фактором, сдерживающим его реализацию. Представляется вполне объективным процесс размывания границ между тактическим, оперативным и стратегическим уровнями военного искусства [1]. Классическая «лестничная» иерархия уступает место «голографической» модели, где локальное действие, усиленное технологией, способно порождать эффекты стратегического масштаба, а тактика из искусства ведения боя трансформируется в «тактику систем, алгоритмов и глобальных боевых и информационных эффектов» [2].

Однако констатации данного системного противоречия недостаточно. Формируется насущный методологический вызов: какая концептуальная модель должна прийти на смену устаревшей трехуровневой схеме? Каковы системообразующие принципы, призванные адекватно структурировать военное искусство в эпоху повсеместного применения сетей, многосферных роботизированных систем, искусственного интеллекта и гибридных угроз? Ответ на этот вызов лежит не в плоскости дальнейшей детализации и без того усложнившейся системы, а в поиске интеграционного принципа, способного обеспечить целостность и гибкость управления разнородными силами независимо от уровня их иерархического позиционирования. Таким принципом может стать **интероперабельность**, понимаемая не в узкотехническом смысле совместимости систем связи, а в качестве **фундаментальной способности военной организации в целом к согласованным, эффективным и безопасным совместным действиям в едином информационно-функциональном контуре** [3].

Целью представленной работы является совершенствование структуры военного искусства, основанной на принципе тотальной интероперабельности, определение в ней новой, системообразующей роли формирований космических войск. Для достижения этой цели в статье последовательно решаются следующие задачи: анализ современных тенденций применения космических систем в тактическом звене как проявление кризиса классических доктринальных установок; рассмотрение сущности интероперабельности как системного принципа, охватывающего технический, процедурный и концептуальный уровни управления в теории военного искусства; обоснование перехода от «тактики формирований» к «интеграции сквозных функциональных возможностей» в качестве практической реализации принципа интероперабельности; описание сетевой голографической парадигмы военного искусства и обоснование практических рекомендаций по ее внедрению в теории военного строительства, применения ВВСТ и воинского обучения.

Научная новизна определяется переносом концепта интероперабельности из технической плоскости в область общей теории военного искусства и обосновании его ключевой роли как основы для преодоления межуровневых и межвидовых разрывов в управлении. **Формирования космических войск рассматриваются не как обособленный род войск со своей «частной тактикой», а как интегратор и ключевой провайдер возможностей для единого межвидового информационно-функционального контура.**

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ТАКТИЧЕСКОМ ЗВЕНЕ: ИНТЕГРАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В ТАКТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ, ПРИОБРЕТЕНИЕ ТАКТИЧЕСКИМИ ДЕЙСТВИЯМИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ

Опыт локальных военных конфликтов современности со всей очевидностью продемонстрировал феномен расширяющейся интеграции космических возможностей в тактический уровень и, как следствие, «приобретение тактическими действиями стратегического значения».

Космические системы, традиционно рассматривавшиеся как сугубо стратегический актив, сегодня стали неотъемлемым элементом поля боя. Это проявляется в нескольких ключевых аспектах.

Во-первых, произошло **расширение номенклатуры потребителей космической информации.** Если ранее данные спутниковой разведки или высокоточная навигация были прерогативой высших оперативных и стратегических штабов, то сегодня коммерческие группировки спутников связи (*Starlink*) обеспечивают широкополосным интернетом отдельного бойца или оператора беспилотного летательного аппарата на передовой. Командир батальона в режиме, близком к реальному времени, получает возможность видеть не только свою тактическую зону, но и перемещения резервов противника в оперативной глубине, благодаря данным с геостационарных спутников-шпионов или радиолокационной съемки. Это кардинально меняет природу принятия тактических решений, насыщая их оперативной и даже стратегической информацией.

Во-вторых, сформировался новый вид **борьбы с космическими системами на тактическом уровне.** Поскольку космос стал критическим элементом тактического успеха, противодействие ему сместилось на самый низкий уровень. Радиотехнические подразделения научились эффективно подавлять сигналы спутниковой навигации (GPS, ГЛОНАСС) и связи на ограниченном участке фронта, «ослепляя» и «оглушая» тактические подразделения противника. Разрабатываются и применяются мобильные комплексы, способные создавать помехи низкоорбитальным спутниковым группировкам. Это означает, что «бой» за космическое превосходство вышел за пределы специализированных полигонов противоспутниковых вооружений и ведется ежедневно в тактическом звене.

В-третьих, возник феномен **«киберкосмической тактики»,** когда воздействие на космическую инфраструктуру осуществляется не кинетически и не энергией, а программным кодом. Кибератаки на наземные центры управления космическими аппаратами или на каналы передачи данных становятся тактическим инструментом целенаправленной деградации систем управления противника. Образно говоря, хакерская группа, действующая в тактических интересах конкретного формирования, может инициировать кибератаку, последствия которой парализуют навигационное обеспечение целого соединения противника.

Рассматриваемые тенденции со всей очевидностью показывают, что деятельность формирований космических войск более не может быть описана в парадигме «частной тактики», замкнутой внутри своего рода войск. Их потенциал становится **сквозным информационно-функциональным ресурсом,** востребованным на всех уровнях теории и практики военного искусства. Однако сама военная организация, ее структура управления и доктрины остаются заложниками ведомственного, «вертикального» подхода. Это порождает системный разрыв между потребностями тактического звена в возможностях и способностью системы управления эти возможности предоставить быстро и эффективно. Устранение этого разрыва требует нового системообразующего принципа, в качестве которого предлагается принцип интероперабельности.

ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ: ОТ ТЕХНИЧЕСКОГО СТАНДАРТА К СИСТЕМНОМУ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ПРИНЦИПУ ВОЕННОГО ИСКУССТВА

В классическом понимании **интероперабельность** сводится к *обеспечению технической совместимости систем связи и управления, позволяющей им обмениваться разноформатными данными* [4]. Однако для преодоления выявленных выше кризисных явлений этого недостаточно. В контексте предлагаемой модели интероперабельность предлагается определять как *фундаментальную способность разнородных сил, средств и систем различных видов ВС, родов войск и даже ведомств к оперативному, согласованному, своевременному* и безопасному *совместному использованию информации, возможностей и ресурсов для достижения единой боевой цели*.

Данный принцип реализуется на трех взаимосвязанных и равнозначных уровнях, образующих пирамиду интероперабельности [5].

Техническая интероперабельность является базовым, материальным фундаментом всей системы. Она подразумевает:

– совместимость протоколов и форматов данных (единые стандарты обмена информацией, при которых данные, полученные с оптико-электронной системы разведывательного спутника, могут быть автоматически, без ручного преобразования, обработаны системой управления огнем артиллерийской бригады и преобразованы в координаты для поражения);

– открытые архитектуры и интерфейсы прикладного программирования (возможность для новых систем, в том числе коммерческих [например, коммерческих группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли), «встраиваться» в общевойсковую систему управления через стандартизированные интерфейсы – подобно тому, как приложения подключаются к операционной системе смартфона];

– единая сетецентрическая среда (создание защищенного, живучего информационного контура, в котором каждый уполномоченный абонент – от командующего до солдата – является не просто потребителем, но и потенциальным источником данных).

Без достижения технической интероперабельности любые попытки наладить сквозное взаимодействие обречены на провал. Однако сама по себе она не гарантирует успеха.

Процедурная интероперабельность – это уровень согласованных регламентов и процессов, определяющих порядок взаимодействия всех элементов сложной организационно-технической системы. Структуру процедурной интероперабельности должны формировать:

– единые тактические процедуры (стандартизированные алгоритмы запроса и оказания поддержки. Например, унифицированный процесс, по которому командир мотострелковой роты запрашивает и получает данные с беспилотного комплекса, находящегося в подчинении общевойскового объединения, или формирует заявку на подавление связи и использует эффект от постановки помех, обладающего наилучшими возможностями для решения этой задачи независимо от его организационной принадлежности);

– общие регламенты целеуказания [единый «язык» для описания целей, позволяющий средствам объективного контроля, поражения и командованию однозначно идентифицировать объект и оценивать параметры его поражения (подавления)];

– совместимые циклы планирования [синхронизация процессов планирования боевых действий в общевойсковых штабах и штабах родов войск (в частности, космических), чтобы «окна» для проведения информационно обеспечения или сеансов связи были рационально «вписаны» в общий замысел операции].

Процедурная интероперабельность превращает техническую возможность обмена данными в эффективную практику совместных согласованных действий.

Концептуальная интероперабельность является высшим, системообразующим уровнем. Она относится к сфере общего восприятия картины боя, доверия к решениям, принимаемым за пределами компетенций своего органа управления. Реализация этого уровня требует:

– общей осведомленности о ключевых параметрах обстановки (не просто доступ к одной и той же карте, но единое и непротиворечивое восприятие тактической и оперативной обстановки всеми участниками боевых действий);

– общей философии управления (переход от жесткой, иерархической централизованной модели к децентрализованной, когда нижестоящим начальникам предоставляется свобода маневра в рамках общей задачи, поскольку вышестоящее командование доверяет их пониманию обстановки, обеспеченному единым информационно-управленческим полем);

– единой оперативной культуры (преодоление межведомственной разобщенности и формирование у командиров всех уровней и родов войск «сетевого» мышления, при котором они мыслят себя не как «танкистов» или «связистов», а как «интеграторов» своих специфических боевых возможностей в процесс достижения общей цели).

Именно на указанном уровне происходит окончательный разрыв с линейно-иерархической парадигмой. Формирования космических войск в этой модели перестают быть «вспомогательным родом войск» и становятся равноправными соавторами оперативно-тактического успеха, чьи возможности изначально встроены в логику действий тактического звена. Их «тактика» окончательно трансформируется из «способов выполнения задач» в непрерывный процесс предоставления сквозных информационно-функциональных возможностей для единого межвидового разведывательно-огневого контура. Достижение такой степени интеграции является сложнейшей задачей, но именно оно определяет облик военного искусства будущего.

КОНТУРЫ НОВОЙ МОДЕЛИ ВОЕННОГО ИСКУССТВА: СЕТЕЦЕНТРИЧНО-ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА

На основе принципа тотальной интероперабельности формируется новая модель военного искусства, в основу которой положена ***сетецентрично-голографическая парадигма*** [6]. В отличие от классической «лестничной» структуры, где каждый уровень жестко детерми-

нирован своими пространственно-временными параметрами и масштабом решаемых задач, предлагаемая модель основана на трех взаимопроникающих осях координат:

1) **ось «Масштаб эффекта»** заменяет традиционное разделение на тактический, оперативный и стратегический уровни. В новой парадигме любое формирование оценивается по наличествующему потенциалу создания эффектов различного масштаба: тактический эффект (непосредственное воздействие на противника в зоне боевых действий); оперативный эффект (влияние на ход операции или кампании); стратегический эффект (воздействие на военно-политическую ситуацию в целом;

2) **ось «Функциональные сферы»** объясняет равноправие и взаимосвязь всех сфер ведения вооруженной борьбы: традиционные физические сферы (суша, море, воздух); новые оперативные сферы (космос, киберпространство, информационная сфера); электромагнитный спектр как сквозная сфера воздействия;

3) **ось «Время цикла управления»** акцентирует скорость принятия и реализации решений: стратегическое время (месяцы, годы); оперативное время (дни, недели); тактическое время (часы, минуты); реальное время (секунды).

В данной трехмерной системе координат формирования космических войск одновременно существуют во всех измерениях: они создают стратегические эффекты (глобальная разведка), функционируют в особой сфере (космосе) и оперируют в тактическом времени (поддержка ударных групп).

Реализация предлагаемой модели потребуют кардинальных изменений в организации управления войсками (силами), например:

– создания центров (пунктов) интеграции сквозных информационно-функциональных возможностей вместо ведомственных штабов;

– формирования межвидовых тактических групп, объединяющих специалистов разных родов войск;

– внедрения комплекса организационно-технических мер по обеспечению интероперабельности на всех уровнях;

– разработки единых стандартов обмена данными для всех видов войсковых формирований и систем вооружения;

– создания открытых программных архитектур управления;

– внедрения систем искусственного интеллекта для поддержки принятия решений.

Критическим фактором перехода к новой парадигме военного искусства является трансформация процесса подготовки военных кадров. Ее ключевым элементом должно стать введение сквозной программы подготовки офицеров, обладающих «голографическим мышлением». Их основной функцией в предлагаемой сетецентричной модели управления должно стать не прямое «классическое» командование подчиненными подразделениями, но прежде всего согласование боевых возможностей и координация усилий разнородных и разноведомственных формирований для достижения общего оперативно-тактического успеха. Формирование таких специфических компетенций возможно только на базе межвидовых учебных центров посредством разработки, внедрения и постоянной модификации учебно-методического инструментария, адекватно отражающего текущие изменения условий вооруженной борьбы на всех уровнях организации и ведения боевых действий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно предположить, что на данном историческом этапе классическая трехуровневая структура военного искусства, возможно, исчерпала свой эвристический потенциал (теории, концепции или методы военного искусства не способны продуцировать новые знания, открывать неизвестные ранее закономерности и служить источником принципиально новых решений). Жесткое разделение на тактику, оперативное искусство и стратегию более не со-

ответствует реалиям современных боевых действий с присущим им эффектом стирания границ между уровнями управления, в которых тактические формирования способны создавать стратегические эффекты.

В то же время формирования космических войск все больше трансформируются из специализированного рода войск в ключевой элемент реализации межвидового и межведомственного потенциалов военной организации государства. Их основная функция смещается от решения узковедомственных задач к предоставлению сквозных информационно-функциональных возможностей для всех видов и родов войск.

Реализация таких возможностей в современных формах военных действий объективно требует преодоления межведомственной разобщенности и создания единого информационно-функционального контура, которое возможно только через достижение тотальной интероперабельности. Именно поэтому обеспечение интероперабельности объединяемых сил и средств на техническом, организационном и концептуальном уровнях становится системообразующим принципом военного искусства XXI века.

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке конкретных механизмов реализации предложенной модели, включая:

– детализацию принципов работы центров (пунктов) интеграции сквозных информационно-функциональных возможностей;

– создание научно-методического инструментария оценивания параметров интероперабельности сложных организационно-технических систем специального назначения;

– разработку нормативно-правовой базы для межведомственного взаимодействия;

– формирование новых критериев эффективности боевых действий.

Предлагаемая сетецентрично-голографическая парадигма новой модели военного искусства позволит адекватно описать современный характер вооруженной борьбы и создать теоретическую основу для военного строительства будущего. Переход к новой парадигме военного искусства является не теоретической абстракцией, а насущной практической необходимостью, от своевременности реализации которой зависит боеспособность военной организации нашего государства в условиях стремительно меняющегося характера вооруженной борьбы.

Список использованных источников

1. *Казахов Б. Д., Грудинин И. В., Майбуров Д. Г.* Эволюция сущности и содержание категории «тактика» с учетом развития теории и практики применения формирований космических войск // Военная мысль. – 2025. – № 11. – С. 26–42.

2. *Гаврилов А. Д., Грудинин И. В., Майбуров Д. Г.* Некоторые прикладные аспекты современной трансформации категории «война» // Вестник академии военных наук. – 2022. – № 1 (78). – С. 55–61.

3. *Гаврилов А. Д., Грудинин И. В., Майбуров Д. Г.* К вопросу о роли и месте концепций в развитии теории и практики военного искусства // Вестник академии военных наук. – 2022. – № 4 (81). – С. 59–68.

4. О проблемах интероперабельности в сложных организационно-технических системах / Д. А. Мосин [и др.] // Военное обозрение. – 2025. – № 1 (25). – С. 113–119.

5. *Макаренко С. И.* Термины и определения в области интероперабельности : справочник. – СПб. : Наукоемкие технологии, 2023. – 41 с.

6. *Макаров В. П.* Гибридные войны: новая реальность вооруженных конфликтов. – М. : Изд-во МО РФ, 2021. – 384 с.

Modeling passive aerospace monitoring data tools under environmental factors / R. S. Volodin, A. P. Kadochnikov, V. Y. Prorok, A. N. Tsybulnik // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 6–18.

This paper analyzes the impact of radio wave refraction on the capabilities of passive aerospace monitoring data tools. Calculations of the line-of-sight range and operating zone of passive aerospace monitoring data tools under conditions of environmental heterogeneity and seasonal variations are presented. A software package developed in MATLAB allowed for multivariate modeling and the quantitative dependence of key characteristics on meteorological parameters. It is shown that accounting for refraction effects allows for an increase in the predicted detection range and operating zone area without changing the system hardware.

Key words: information capabilities, passive aerospace monitoring data tools, radio wave propagation, refractive index, refraction, operating zone, line-of-sight range.

Mosin D. A., Feder A. L., Chashchin S. V. A set-theoretical model for assessing the resilience of automated systems in a duel «object-invider» situation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 19–34.

This paper is devoted to modeling and assessing the cyber resilience of automated systems in a duel «object-intruder» situation. A quantitative measure of resilience is introduced based on two metrics: architectural state (Css) and functional effectiveness (KZsr). For their calculation, a formal framework has been developed that combines set-theoretic models of the system (Mst), threats (Mth), countermeasures (Mcm), and recovery (Msv), as well as a method for assessing dynamics based on Markov chains. Simulation modeling confirmed that the synergy of countermeasures and recovery increases the Css and KZsr by up to 32%. The maximum effect (an increase in KZsr from ≈38% to ≈82% and the resilience level to 76%) was achieved with a combination of proactive countermeasures and adaptive recovery mechanisms. The results demonstrate the practical applicability of this approach for transitioning to proactive defense strategies for automated systems.

Key words: cyber resilience, automated system, duel situation, system state indicator (Css), task completion rate (KZsr), set-theoretic model.

Belyankin P. V., Zhukov E. T. Development of methods of time transmission through long-distance navigation and communication radio stations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 35–48.

The article presents a ways to improvement the State System of Unified Time and Reference Frequencies (GSEVECH) in part of efficiency, noise immunity, information content and availability the time transfer by long range navigation and long distance communication transmitting stations.

The new science - engineering solutions is to utilize the binary Phase-shifting keying (BPSK) to transmitting the time markers, current time value and correction value to Universal Time value determination. This made possible to speed up in several times the time markers detection and reduce the time transfer frame duration by long distance communication radio channel from 47 to 15 minutes.

Key words: State System of Unified Time and Reference Frequencies, system of unified time, time scale, time transfer, ground-based radio navigation systems pulse-phase radio navigation system, Binary Phase- Shifting Keying.

Berdyugin I. S., Kosyrev A. V. Probabilistic model of the states of technology in the system of technical support for communications and automated control systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 49–59.

The article describes probabilistic model of the states of technology in the system of technical support for communications and automated control systems. The goal is to increase the efficiency of the communication technical support system and automated control systems. The stages of the model are presented, including the definition of a set of parameters that affect the state of the equipment, taking into account external factors, constructing analytical expressions for the time characteristics of failure and restoration of communication equipment and automated control systems. The theoretical and practical significance of the developed model are substantiated.

Key words: the system of technical support for communications and automated control systems, efficiency improvement, probabilistic model, differential equations, recovery.

A method of all-round and omniscient recognition of the type of single, typical composition of group air target in various types of combat orders in non-stationary monitoring of secondary modulation signals in pulsed-Doppler radar system / A. V. Bogdanov, S. V. Maksimovich, A. A. Tolmachev, A. L. Feder, R. D. Chizhevsky // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 60–70.

A method is presented for all-angle and all-altitude recognition of the type of a single, typical composition of group aerial target in various types of combat formations with unsteady observation of secondary modulation signals in a pulsed-Doppler radar system.

Key words: a method for recognizing the type of single and typical composition of a group air target; radar signal; Doppler frequency counts; estimation of the trajectory of Doppler frequency; neural network; the dynamic model; spectral and trajectory Doppler portaits.

Burcev Y. V., Kolkovskiy Y. V. Ground-based experimental testing of a high resolution spaceborne synthetic aperture radar system using the inverse experiment method // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 71–79.

The results of full-scale ground-based tests using the inverse experiment method of a high-resolution spaceborne synthetic aperture radar (SAR) system developed by AO NPP “Pulsar” are presented.

Key words: synthetic aperture radar (SAR), inverse synthesis, space target objects, spatial and radiometric characteristics, radar image.

Vozmischev I. Y., Gryaznova K. S., Manukhov I. G. A model of phase screens for the task of investigating the efficiency of adaptive optical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 80–86.

The article considers an approach to modeling the phase shield of optical radiation after its passage through a randomly inhomogeneous medium – the Earth's atmosphere. The novelty of the work lies in the consideration of the propagation process of optical coherent radiation along the Earth-space propagation path. The main simulation results obtained in astronomical observatories are aimed at optical observations of distant space objects - stars from the Earth's surface. At the same time, the propagation of optical radiation in the opposite direction, despite all the similarity of physical processes, is an insufficiently studied process. The main indicator of the turbulence of the optical radiation propagation medium is the radius of spatial coherence of the atmosphere, an indicator that characterizes the size of the inhomogeneity of the refractive index. To solve the problem of modeling the propagation of an optical wave through the Earth's atmosphere, it is necessary to form phase screens corresponding to a turbulent propagation path. This approach makes it possible to evaluate the influence of the Earth's atmosphere on the amplitude-phase distribution of a coherent radiation beam after its passage through the atmospheric path. The need for a separate consideration

of the formation of phase screens is due to the presence of different approaches to their mathematical representation and generation using different software development environments.

Key words: coherent optical radiation, adaptive optics, radius of spatial coherence in the atmosphere, wave front, phase screen, mathematical modelling of the atmosphere.

Voznuk V. V., Maslik A. G. Algorithm for modifying a chaotic signal to achieve a minimum sidelobe level of its autocorrelation function // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 87–99.

This paper addresses the relevant problem of synthesizing wideband signals with specified correlation properties. The high sidelobe level of the autocorrelation function of chaotic and pseudorandom signals is a significant drawback that limits their application in high-precision radar, navigation, and telecommunication systems, as it leads to reduced resolution and an increased probability of false detections. An original algorithm for the iterative modification of the signal structure is proposed, based on gradient descent in a multidimensional space. The algorithm aims to simultaneously maximize two target ratios: the peak main lobe-to-sidelobe ratio and the energy main lobe-to-sidelobe ratio. The problem is solved using numerical computation of the gradient of the objective functions via the finite-difference method and an adaptive rule for modifying signal sample amplitudes with a proportionality coefficient.

It is shown that modifying the initial chaotic signal results in significant suppression of the sidelobe level: the ratio of the main lobe's peak value to the maximum sidelobe and to the average sidelobe level increases several times. An important advantage of the algorithm is the preservation of the original signal's statistical properties, as confirmed by the analysis of amplitude distribution histograms. The developed approach is of interest for designing new classes of signals with improved correlation properties.

Key words: autocorrelation function, sidelobes, signal modification, gradient descent, finite-difference method, peak-to-average power ratio, digital signal processing.

Efanov A. S. The model of functioning of an information and telecommunication system with multiple subscriber radio access // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 100–110.

This article examines the availability of information exchange for radio monitoring and technical computer control systems. The purpose of this article is to determine the relationship between the availability of communication equipment for monitoring systems and the requirements for information exchange in the information direction and the options for their use in an information and telecommunications network with multiple subscriber radio access in the presence of destabilizing factors.

Key words: information and telecommunications network, subscriber radio access network, information exchange control.

Logunov S. V., Maltsev G. N., Nakhov S. A. Model for converting photometric characteristics of artificial space objects into energy characteristics // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 111–118.

The article shows that the values of the reduced radiation intensity readings based on the catalog stellar magnitudes of standard stars and the measured stellar magnitudes observed by ground-based optical means of artificial space objects can be used as classification features for artificial space objects. A model for calculating the photometric characteristics of artificial space objects and converting them into energy characteristics is proposed.

Key words: artificial space object, standard star, stellar magnitude, ground-based optical instrument, radiant power, spectrophotometric information.

Mironov A. N., Sitkov R. A. A systematic approach to choosing the location of complex technical systems using the example of ground-based space infrastructure facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 119–128.

Existing methods for substantiating the siting of ground-based space infrastructure (GSI) facilities are fragmentary and do not provide a direct quantitative assessment of the influence of heterogeneous factors on the operational effectiveness of the deployed objects. A methodology synthesising the apparatus of the theory of effectiveness of purposeful processes and qualimetry methods is proposed for the first time. This synthesis makes it possible to transform the requirements for GSI effectiveness into a formalised vector of indicators and to evaluate it through a quality indicator tree. In contrast to traditional approaches, the methodology establishes a direct quantitative relationship between environmental parameters and the final effectiveness of the facility by means of a mathematical model of operational effectiveness. The analysis of adaptive weighting correction mechanisms has revealed systemic limitations associated with data structure, subjectivity of decisions and the influence of extra-systemic factors. A methodology with fixed weights is proposed that ensures objectivity, reproducibility and transparency of decisions; it includes a formalised selection algorithm and a mechanism for analysing deviations. The practical significance of the work lies in the creation of tools for the systemic audit and improvement of the siting process for GSI facilities and other complex technical systems.

Key words: system approach, rational choice, efficiency theory, qualimetry, quality indicator tree, ground-based space infrastructure.

Poletaev A. M. Earth's Radar From Space: Current State And Development Prospects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 129–141.

A systematic review of organizational, technical and economic trends related to the development and application of space-based radar surveillance is presented. The features of modern methods of implementing on-board antenna systems and trends in their development in the medium term are analyzed.

Key words: Earth remote sensing device, space radar with synthesized antenna aperture, orbital grouping, antenna system.

Prokofiev M. Y., Chuvirov A. A. The methodological approach to assessment and management of functional reliability of communication network switching nodes // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 142–153.

This article substantiates the critical role of functional reliability as a key component of the overall reliability of communication systems. A hierarchical methodological approach for the operational assessment and management of the functional reliability of switching nodes is proposed, based on the calculation of both unit and complex indicators. A diagram illustrating the dependencies between these indicators is presented. The developed calculation mechanisms facilitate a transition from reactive to preventive reliability management, enabling the planning of technical maintenance based on the forecasted state of functional reliability. Key directions for improving management efficiency are identified, including the optimization of functional failure criteria using the dynamics of the proposed indicators and diagnostic algorithms based on a state model. A numerical example demonstrates the practical applicability of the developed approach.

Key words: functional reliability, switching nodes, communication networks, reliability assessment, hierarchical mechanism, proactive management, failure diagnostics.

Denisenkov D. A., Zhukov V. Y., Shchukin G. G. Application of the "spectrum width" parameter of the received radar signal for identifying hazardous weather phenomena // Proceedings of the Mil-

itary Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 154–159.

The features of using the "spectrum width" parameter of the received radar signal for identifying hazardous weather phenomena are considered. Methods for recognizing wind shear, vertical air currents, and tornadoes, based on esti-mates of this parameter, are examined. It is concluded that this parameter is highly informative and has practical ap-plication potential.

Key words: meteorological radar, remote atmospheric sensing, wind shear, microburst, signal spectrum width, signal base.

Kalyuta A. N. Technological cycles for the use and control of the Meteor-M spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 160–166.

This article examines the objectives of the Meteor-3M hydrometeorological support space system and its implementation by Meteor-M spacecraft. It also describes the onboard data collection and observation system of the Meteor-M spacecraft. Onboard data collection and observation systems in the optical and radio frequency bands allow them to be effectively used for other Earth remote sensing tasks, in addition to providing hydrometeorological support to various classes of users. The article also examines the main characteristics of the onboard data collection systems and their operational cycles in session and continuous modes, as well as the operational cycles for the Meteor-M spacecraft during their flight operations. Structural and functional diagrams of the ground-based special complex and ground control complex of the Meteor-3M space system are presented.

Key words: Meteor-M spacecraft, hydrometeorological information, technological cycles of use and control, ground control complex.

Methods of aerospace optical-electronic topographic survey using dynamic control points (mobile marks) / B. N. Korneev, Y. V. Levadnyi, A. V. Solovyov, I. V. Chernov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 167–177.

This article addresses the problem of geodetic support for aerospace surveys of hard-to-reach areas where ground-based field preparation is impossible. The lack of control points in such areas significantly reduces the accuracy of the resulting maps and orthomosaics. The author proposes new methods of optical-electronic topographic surveying based on the use of dynamic control points—airborne markers (ALMs). The LAM coordinates are determined with high accuracy during surveying by onboard navigation systems, and the LAMs themselves act as control points visible in the images. The paper presents two main implementation approaches, including options with auxiliary cameras. An a priori accuracy assessment is performed: analytical relationships are derived and calculations are performed for spaceborne scanner survey conditions. The results show that the use of four LAMs allows one to determine the coordinates of objects in inaccessible areas with a root-mean-square error of about 1.5 m, which is comparable to traditional methods, but at the same time provides independent control of the accuracy of georeferencing directly from the survey materials.

Key words: Aerospace photography, Earth remote sensing, photogrammetry, georeferencing, geodetic base, inaccessible territory, dynamic reference point, aerial vehicle-mark, mobile mark, topographic camera, exterior orientation elements, a priori accuracy assessment, stereo photography.

Andrushkevich D. V. A method for assessing the impact of news information on a target audience // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 178-185.

This article presents a methodology for assessing the impact of news content on a target audience. The methodology is based on assessing users' emotional reactions to news messages using

machine learning algorithms for sentiment classification and graph theory for visualizing and analyzing social interactions. A key element of the methodology is the integration of Porter's stemming algorithm for preprocessing text data and a naive Bayes classifier for determining sentiment. The developed software package demonstrates significant improvements in speed and accuracy compared to traditional analysis methods, confirming the practical applicability and adequacy of the proposed approach.

Key words: target audience, impact, sentiment analysis, machine learning, graph theory, social networks, Porter's stemming algorithm, naive Bayes classifier, cluster analysis.

Biryukov D. N., Telishev A. V. Analysis of security of modern access control and management systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 186–199.

An analysis of open sources for the presence of information revealing technologies on which access control and management systems are based is carried out. Technologies of radio frequency identification from the position of security are considered. Modeling of attacks on widespread radio frequency identifiers is carried out. Potential threats to physical security of information are considered. Proposals have been put forward to improve the security level of access control and management systems.

Key words: Access control and management system, RFID, MIFARE, smart card, proxmark3.

Bogdanov V. S., Lazarev A. A., Parshunin D. Y. A method of structural and functional analysis of the unified multi-service network of the russian ministry of defense using intelligent multi-agent systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 200–207.

In the context of highly dynamic changes in the theater of military operations, the implementation and use of intelligent multi-agent systems is advisable. This article proposes a method of structural and functional analysis based on the results of a study of the functioning of the unified multi-service network of the Russian Ministry of Defense using such intelligent multi-agent systems.

Key words: Increased warfare dynamics, control system in a unified information space, subnet scanning, increasing scan depth with decreasing scan time, agent scheduler, analysis of the protected system.

Solovyov I. A., Stelmach S. F. Formal rules and procedure for calculating the complex indicator of the current state of security of objects information infrastructure (informatization) // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 208–220.

The publication provides clarifications of the formal rules and order for constructing the process of determining the value of a complex indicator of the current state of security and information security of information infrastructure (informatization) facilities based on an expanded list of elements of the procedure for its detailed calculation, as well as the composition and content of the input parameters used. A special feature of these clarifications is their implementation in accordance with proposals to improve the regulator (in the field of ensuring the security of objects information infrastructure) the methodical approach adopted by to assess this indicator, a package of which was formed during public discussions by specialists of the draft methodology for its assessment.

Key words: government agencies (organizations), information systems, information objects information infrastructure (informatization), assessment of the state of information protection (ensuring security), private (group) security indicators, complex security indicator, minimum (basic) level of security, level of information protection (ensuring security) of objects informatization.

Abdurakhimov A. A., Denisov A. M., Nechaev I. Y. Methodology for selecting the orbital structure and substantiating the parameters of small spacecraft multi-satellite orbital constellation of the

space communications system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 221–230.

The article present a methodology for substantiating the parameters of multi- satellite multi-satellite orbital constellation based on the integrated (joint) of the ballistic structure of the orbital structure and the parameters of its small spacecraft by the criterion of minimum cost. Examples of calculations of the parameters of multi-satellite orbital groupings of a space communication system based on small spacecraft are given, demonstrating patterns of building an orbital segment of the space system depending on the choice of the altitude of the orbit.

Key words: small spacecraft, ballistic structure, multi-satellite orbital group.

Methodology for assessing the possibility of replenishing the stock of obsolete elements of a complex military-technical system / E. V. Basotin, R. M. Vivchar, A. V. Krivonosov, I. E. Saal // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 231–245.

The article discusses the problem of limited availability of elements of complex military-technical systems, which is caused by the progressive obsolescence of both the equipment itself and the restrictions on the supply of foreing-made components. Scientific and methodological support has been developed to quantify the likelihood of implementing an alternative scenario for acquiring elements, in the form of a comprehensive methodology for assessing availability that takes into account the possibility and conditions of element cannibalization, the use of analog elements, and the possibility of resuming (restoring) production by both the original manufacturer and a third-party enterprise in the event of production termination. This method uses non-standard approaches to processing heterogeneous information from various sources. The use of this methodology will reduce the risk of forced equipment downtime caused by the lack of spare parts, as well as improve the validity of management decisions to maintain the required level of readiness for complex military-technical systems.

Key words: complex military-technical system, availability for purchase, cannibalization, analogues, criticality matrix, fuzzy model.

Zagorny S. V., Kazimirov A. V., Lashko R. O. Model of thermobaric impact of explosion on safety facilities in operation of the complex of filling of rocket carriers with liquid natural gas // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 246–267.

The article describes the model of thermobaric impact of explosion of combustible cloud on safety facilities, formed by rocket fuel component and air in case of depressurization of elements of hydraulic system of complex of filling of rocket carriers with liquid natural gas. The model is based on the physical and chemical properties of liquefied natural gas and the use of probit analysis, which allows for the determination of the probabilities of damage to safety facilities caused by the shock wave and radiant heat flow resulting from the initiation of this component of rocket fuel in a mixture with air. The article also provides an algorithm for calculating the thermobaric impact, its assessment, and analysis for a typical case of cryogenic pipeline depressurization.

Key words: launch vehicle refueling complex, liquefied natural gas, shock wave, thermal radiation, combustible.

Ivanets M. O., Popov A. M., Tkachenko V. V. Verification of multimspectral space survey data processing pipelines based on colored Petri nets // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 268–275.

The paper considers the problem of formal verification of pipelines for post-processing remote sensing data based on color Petri nets (CPN). Despite the seemingly trivial requirements for the spectral composition of data, in conditions of heterogeneity of sources, scalability of processing and

high responsibility for results, such conditions become critically important for ensuring reliability and trust in the system. A strict CPN pipeline model is proposed, in which the markers reflect the structure of real-world remote sensing data, and the transition guards encode the conditions for correct processing. For acyclic networks with local arrays, the solvability of the reachability problem without simulation is proved: the condition for the appearance of the result in the output position is reduced to a static check for the required spectral channels in the initial labeling. It is shown that the formal approach makes it possible to eliminate errors at the design stage, providing a provable guarantee of the correctness of calculations. The results emphasize the importance of using formal methods in geographic information systems as a means of increasing reproducibility, transparency, and certificability of Earth remote sensing data processing pipelines.

Key words: color Petri nets, Earth remote sensing, formal verification, post-processing of satellite data, spectral channels, data processing pipeline.

Method of remote diagnostics of the emission spectrum of a propulsion system torch using a reference source / Kobzar A. A., Kukushkin I. O., Petukhov A. I., Prosyannikov D. G. // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 276–280.

This paper examines the influence of the Earth's atmosphere on the accuracy of remote spectral analysis of liquid rocket engine (LRE) plumes. It is shown that during remote diagnostics of LRE propulsion system plumes, selective absorption and scattering of radiation along the atmospheric path lead to significant distortions of the recorded spectra, complicating the determination of true temperatures, component concentrations, and combustion rates. A mathematical model of radiation transfer through the atmosphere is presented, taking into account the main distortion factors: absorption by molecules (H_2O, CO_2, O_3, O_2), Rayleigh and aerosol scattering. Methods for leveling out atmospheric effects are considered and analyzed, including synchronous measurement of the spectra of reference sources, the use of atmospheric models (MODTRAN, HITRAN), and numerical correction algorithms. A model study is conducted demonstrating the magnitude of distortions for typical conditions and the effectiveness of correction methods.

Key words: torch spectroscopy, atmospheric distortions, radiative transfer, absorption, scattering, spectral correction, liquid rocket engines, remote diagnostics.

Krasnoshchyokov S. N., Lukyanenko S. N., Scvortsov D. V. Determining the residual resource of lithium-ion batteries based on telemetry measurements of voltage // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 281–289.

The article proposes two methods for estimating the residual resource of lithium-ion batteries on the analysis of voltage measurement data. Algorithms for processing initial data and determining the dependence of battery capacity on operating time are described. Calculation formulas are given that make it possible to estimate the probability of uptime operation of lithium-ion battery at a given time.

Key words: lithium-ion batteries, residual resource, discharge curve, discharge time, charge-discharge cycle.

Krasnoshchyokov S. N., Sivolap V. A., Scvortsov D. V. Justification of the accumulation coefficient of the working fluid of the air intake of a small ultra-low-orbit spacecraft with a low-thrust engine // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 290–302.

The paper presents a rationale for the requirement for a system for collecting and storing atmospheric gas (the accumulation coefficient of the working fluid of the air intake) during the movement of a low-orbit small spacecraft (SSC) with a low-thrust propulsion system. Using mathematical models of the motion of a low-orbit SSC with a low-thrust propulsion system with an atmospheric

gas (working fluid) accumulation system, the results of numerical experiments were obtained for various ranges of trajectory tubes.

Key words: small spacecraft, low-thrust engine, ultra-low-orbit, simplest control program, air inlet.

Inozemtseva L. A., Kuzhekin N. S. Formation of Military Professional Competencies as an Axiological Imperative of Additional Professional Training and Advanced Training Programs for Teachers // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 303–308.

The article discusses the relevance of developing military-professional competencies among teachers in the context of modern socio-political and educational challengers as an axiological imperative in the training of teachers during the development of additional professional programs of professional retraining and advanced training.

Key words: competence-based approach, axiological imperative, military-professional competencies, teaching staff, additional professional education, educational technologies.

Moldovanova S. M., Musienko S. A. Problem of ensuring the unity of fundamentalization and professional orientation of the content of engineering education in military educational institutions // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 309–315.

Modern training of military engineers is faced with the need to combine the deep development of fundamental knowledge and the acquisition of specific professional competencies. The article examines the theoretical and methodological foundations that reveal the common connections and fundamental differences between the two approaches to building engineering education, highlights the advantages and disadvantages of each approach, identifies the most effective methodological techniques and forms of organization of the educational process that make it possible to successfully synthesize the approaches under consideration in the training of military engineers, analyzes the main problems that hinder Objective and subjective factors have been identified to achieve harmony between fundamental knowledge and the professionalization of military specialists, causing the emergence of contradictions.

Key words: fundamentalization, professional orientation, engineering education, competence, innovativeness, integration.

Potyaev P. Y. Psychological and pedagogical prevention of polar tension syndrome in military personnel based on ethnocultural practices of indigenous peoples of the Arctic // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 316–323.

The article is devoted to overcoming the limitations of traditional approaches to the prevention of polar stress syndrome in military personnel in the Arctic, which do not take into account the deep adaptation of humans to extreme factors. In this regard, the article substantiates the expediency of integrating the ethnocultural practices of the indigenous peoples of the North, which have been developed through centuries of natural selection. The article proposes a systematic approach to the adaptation of worldview models and behavioral strategies of indigenous cultures. The implementation of these areas will help to develop stable skills of psychophysiological self-regulation and improve the combat readiness of personnel.

Key words: polar tension syndrome, Arctic zone, military personnel, psychological and pedagogical prevention, ethnocultural practices, indigenous peoples of the North.

Belenovich O. V. Tarasov A. V., Fedulov S. V. Leningrad military theoretical school of pilots-school of heroes. Heroes of the Soviet Union Guards captain G.D. Vasilyev // Proceedings of the

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 324–329.

The Great Patriotic War began 85 years ago. Graduates of the Leningrad Military Theoretical School of the Red Army Air Force, which trained a large squad of pilots in 1924-1933, made a significant contribution to the Great Victory over Nazi Germany. Many of them became military leaders, commanded aviation regiments, divisions, corps, and were awarded the high title of Hero of the Soviet Union.

In an article dedicated to a graduate of the Sevastopol Naval School of Coastal Defense named after LKSMU, the Leningrad Military Theoretical School of Pilots, and the Yeisk Naval Aviation School named after Stalin to Grigory Dmitrievich Vasiliev, his life and military path is shown.

Key words: Sevastopol Naval School of Coastal Defense named after LKSMU, Leningrad Military Theoretical School Red Army Air Force, aviation squadron, combat mission.

Muksinov K. B., Tarasov A. V., Fedulov S. V. Combat activities of P.I. Pavlov, a graduate of the military theoretical school of the Red Air Fleet, and his students in the battle for Leningrad // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 330–337.

In the year of the 80th anniversary of the Great Victory, in accordance with the Decree of the President of the Russian Federation V.V. Putina, August 9 was approved as the Day of Military Glory of Russia, dedicated to the end of the Leningrad Battle. This event testifies to the significance and greatness of the heroic deed of the defenders of Leningrad. The article shows individual episodes of the combat activities of one of the graduates of the Military Theoretical School of the Red Air Fleet, pilot, commander of the fighter aviation regiment of Hero of the Soviet Union Pavel Ivanovich Pavlov and his subordinate students in the Battle of Leningrad.

Key words: Military Theoretical School of the Red Air Fleet, Hero of the Soviet Union, fighter pilots, 21st Fighter Aviation Regiment.

Ogorodnikov V. P. The ontological and epistemological problems of artificial intelligence // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 338–344.

The article reveals the connection between the ontological and epistemological problems of artificial and natural intelligence. On this basis, it shows the significant difference in their essence and functions. A comparative analysis of the weak and strong hypotheses of artificial intelligence, the symbolic and connectionist paradigms of artificial intelligence is performed. The article demonstrates the connection between the philosophical problems of artificial intelligence and the theory of reflection and the problem of the criterion of truth.

Key words: ontology and epistemology of natural and artificial intelligence, reflection and cognition, weak and strong hypotheses of artificial intelligence, symbolic and connectionist paradigms of artificial intelligence, and the truth in the work of artificial intelligence.

Repyakh N. A., Hrustova A. N. Humanity, the universe, and the cosmos in the philosophical narratives of k.e. tsiolkovsky // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 345–352.

This article examines the cosmo-philosophical views of the eminent Russian scientist K. E. Tsiolkovsky, a researcher in the field of spaceflight and rocket science and the founder of modern astronautics.

Key words: cosmic philosophy, the Cosmos, the Universe, Humanity, ethical concept, perfect life, social governance, moral transformation, epistemological problems.

Interopirabilty as the basis of a new model of military art: the role of space forces formations in the creation of a single information and functional circuit / A. S. Gromov, I. V. Grudinin,

B. A. Letuchev, D. G. Mayburov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2026. – Release 699. – P. 353–358.

The article states a fundamental transformation in the theory and practice of tactics. The key factors driving these changes are the comprehensive technologization of the battlefield, network-centric control principles, and the growing role of information warfare. The author examines in detail the specifics of the tactics of space forces units, whose activities fundamentally differ from those of classical military branches. The article substantiates the thesis of the blurring boundaries between the tactical, operational, and strategic levels of warfare. It concludes that it is necessary to revise the established three-level structure of military art and develop a new, more flexible conceptual model.

Key words: military art, tactics, space troops, interoperability, network-centricity network-centric holographic paradigm, cross-domain functional capabilities, levels of warfare (tactical, operational, strategic), information-functional circuit, information superiority, command and control.

Абдурахимов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mil.ru

Андрушкевич Дарья Владимировна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 902-13-00, e-mail: vka@mail.ru

Басотин Евгений Викторович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-87, e-mail: vka@mil.ru

Беленович Олег Вениаминович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka.spb.ru

Белянкин Павел Владимирович, Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский Завод», Институт радионавигации, времени и космической аппаратуры (192012, Россия, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120, лит. ЕЦ); тел.: 8 (812) 665-58-80, e-mail: pvbjobbox@mail.ru

Бердюгин Иван Сергеевич, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (908) 983-33-57, e-mail: ivan22mailru@mail.ru

Бирюков Денис Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 952-20-62.

Богданов Александр Викторович, доктор технических наук, профессор; Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170100, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50); тел.: 8 (903) 807-32-48, e-mail: balinka_@inbox.ru

Богданов Виктор Сергеевич, кандидат технических наук; Восьмое управление ГШ ВС РФ (119160, Россия, Москва, ул. Знаменка, 14/1).

Бурцев Юрий Валентинович, кандидат технических наук; АО «НПП «Пульсар» (105187, Россия, Москва, Окружной проезд, 27); тел.: 8 (901) 406-87-47, e-mail: y_v_b@ mail.ru

Вивчарь Роман Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-87, e-mail: vka@mil.ru

Возмищев Иван Юрьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-59, e-mail: vka@mil.ru

Вознюк Валерий Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mil.ru

Володин Роман Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Громов Александр Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (953) 361-87-91, e-mail: vka@mil.ru

Грудинин Игорь Владимирович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановска, 13); тел.: 8 (981) 742-47-65, e-mail: vka@mil.ru

Грязнова Катерина Сергеевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Денисенков Дмитрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (905) 219-59-16, e-mail: vka@mil.ru

Денисов Андрей Михайлович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mil.ru

Ефанов Антон Сергеевич, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (929) 609-33-79, e-mail: t_o_x_@list.ru

Жуков Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук; Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79); тел.: 8 (921) 998-12-06, e-mail: vuzhukov2002@list.ru

Жуков Евгений Тимофеевич, кандидат технических наук; Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) (191187, Россия, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10); тел.: 8 (812) 275-11-18, e-mail: zhyket@mail.ru

Загорный Сергей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (952) 391-06-56, e-mail: vka.spb.ru

Иванец Максим Олегович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Иноземцева Людмила Александровна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кадочников Андрей Павлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Казимиров Артём Витальевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 995-69-04, e-mail: vka.spb.ru

Калюта Андрей Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кобзарь Александр Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Колковский Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор; АО «НПП «Пульсар» (105187, Россия, Москва, Окружной проезд, 27); тел.: 8 (985) 160-22-22, e-mail: kolk@pulsarnpp.ru

Корнеев Борис Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76.

Косырев Александр Вячеславович, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (930) 178-43-85, e-mail: sashka13rup@mail.ru

Краснощёков Сергей Николаевич, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 347-97-19.

Кривоносов Алексей Викторович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-87, e-mail: vka@mil.ru

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кукушкин Игорь Олегович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Лазарев Александр Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Лашко Руслан Олегович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Левадный Юрий Валерьевич, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76.

Летучев Борис Александрович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Логунов Сергей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-33.

Лукьяненко Сергей Николаевич; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (961) 540-33-32.

Майбуров Дмитрий Генрихович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 710-37-74, e-mail: vka@mil.ru

Максимович Сергей Викторович, Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170100, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50); тел.: 8 (915) 701-06-48, e-mail: Serega-max@yandex.ru

Мальцев Георгий Николаевич, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32.

Манухов Игорь Геннадьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-59, e-mail: vka@mil.ru

Маслик Александр Геннадьевич, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mil.ru

Миронов Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Молдованова Светлана Михайловна, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-62, e-mail: vka@mil.ru

Мосин Дмитрий Александрович, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Муксинов Константин Борисович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-08, e-mail: vka@mil.ru

Мусиенко Сергей Анатольевич, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-62, e-mail: vka@mil.ru

Нахов Сергей Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-30.

Нечаев Иван Юрьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-98-77, e-mail: vka@mil.ru

Огородников Владимир Петрович, доктор философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.; e-mail: vka@mil.ru

Паршунин Денис Юрьевич, Автономная некоммерческая организация «Институт инженерной физики» (142210, Россия, Московская обл., Серпухов, Большой Ударный пер., 1а, стр. 1).

Петухов Антон Иванович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Полетаев Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: poletam@mail.ru

Попов Антон Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Потяев Павел Юрьевич, кандидат педагогических наук; профессор Академии военных наук; Дальневосточное гвардейское высшее общевойсковое командное ордена Жукова училище имени Маршала Советского Союза К. К. Рокоссовского (г. Благовещенск) (675000, Россия, Амурская область, Благовещенск, ул. Партизанская, 69); тел.: 8-4162-52-48-03 (20-92), e-mail: potiay@mail.ru

Прокофьев Михаил Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Пророк Валерий Ярославович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Просянников Данила Григорьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Репях Николай Андреевич, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 990-02-38.

Сааль Илья Евгеньевич, Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева, (456313, Челябинская обл., Миасс, Тургоякское шоссе, 1); тел.: 8 (3513) 55-51-91, e-mail: src@makeyev.ru

Сиволап Валерий Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Ситков Роман Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Скворцов Дмитрий Валерьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 701-26-60.

Соловьев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8(812) 347-95-76.

Соловьев Игорь Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Стельмах Станислав Феликсович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Тарасов Александр Владимирович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-04, e-mail: vka@mil.ru

Телишев Александр Витальевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (918) 317-63-78.

Ткаченко Владимир Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-65, e-mail: vka@mil.ru

Толмачев Алексей Александрович, доктор технических наук; Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170100, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50); тел.: 8 (911) 707-39-17, e-mail: the_lexys@bk.ru

Федер Александр Львович, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Федулов Сергей Валентинович, доктор исторических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-04, e-mail: vka@mil.ru

Хрустова Алена Николаевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 702-58-57.

Цыбульник Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор; Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны имени маршала Советского Союза Л. А. Говорова (150001, Россия, Ярославль, Московский пр., 28); тел.: 8 (905) 135-36-29, e-mail: yavvu@mil.ru

Чащин Сергей Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Чернов Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76.

Чижевский Роман Денисович, Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170100, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50); тел.: 8 (924) 284-48-08, e-mail: mr.chizhevsky@mail.ru

Чувиров Алексей Андреевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации и Кабардино-Балкарской Республики; Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт (199106, Россия, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41); тел.: 8 (921) 899-55-05, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Алексеев Виктор Федорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Алексеев Тимофей Владимирович, доктор исторических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Алёшкин Андрей Петрович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Астапович Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Басыров Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Богачев Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Горбулин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89.

Грибакин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Григорьев Андрей Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ершов Николай Владимирович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Зима Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Казахов Батраз Джумаевич, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Клейменов Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Косырев Сергей Викторович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93.

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кузьмин Владимир Никифорович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кукушкин Игорь Олегович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Лохвицкий Владимир Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Маков Александр Борисович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Мальцев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Миронов Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-74.

Новиков Владимир Александрович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Новиков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Огородников Владимир Петрович, доктор философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Онуфрей Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Павлов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-62.

Паршуткин Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Пирогов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Полетаев Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Пророк Валерий Ярославович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Репях Николай Андреевич, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Садин Дмитрий Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Сахно Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Семенов Кирилл Владимирович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Сотник Дмитрий Сергеевич, доктор военных наук; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Теренин Андрей Евгеньевич, кандидат психологических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Шмелев Валентин Валерьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Штанько Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Якимов Виктор Леонидович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru