

**Труды Военно-космической
академии имени А. Ф. Можайского**

Научное рецензируемое издание

Выходит с 1942 года

Выпуск 685

Проблемы военно-
прикладной
геофизики и
контроля состояния
природной среды

2022 г.

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
кандидат техн. 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 истор. наук, доц.; **А. П. Алёшкин**, доктор техн. наук, проф.;
В. Н. Арсеньев, доктор техн. наук, проф.; **Д. Н. Бирюков**, доктор техн. наук, доц.;
И. А. Готюр, доктор техн. наук, проф.; **А. П. Доронин**, доктор техн. наук, проф.;
И. Ю. Еремеев, доктор техн. наук, проф.; **В. Н. Калинин**, 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.;
Т. О. Мысливцев, доктор техн. наук, доц.; **А. Н. Павлов**, доктор техн. наук, проф.;
А. В. Паршуткин, доктор техн. наук, проф.; **Н. А. Репях**, кандидат филос. наук, доц.;
А. М. Сычева, доктор техн. наук, доц.; **И. В. Фоминов**, доктор техн. наук, доц.;
К. Ю. Цветков, доктор техн. наук, проф.; **А. В. Чарушников**, доктор воен. наук, проф.

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 включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Выпускающий редактор:
А. В. Головина
Технический редактор
и компьютерная верстка: **Е. Е. Лавриенко**
Техническая поддержка:
К. И. Чувирова

Адрес:
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;
тел.: 8 (812) 347-97-69;
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 14.10.2022.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 67,00. Уч.-изд. л. 33,25
Тираж 50 экз. Заказ 4032/92/9.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Анискина О. Г., Стогниева В. В., Толстоброва Н. Б.</i> Прогноз гроз с помощью мезомасштабных гидродинамических моделей	6
<i>Баранюк А. В., Кулешов В. П., Митник Л. М., Митник М. Л., Панфилова М. А.</i> Мониторинг гидрометеорологических процессов в Арктическом регионе со спутников «Арктика-М» № 1, GCOM-W1, GPM, «Метеор-М» № 2-2, MetOp и Aqua	11
<i>Бейтуганов М. Н., Чочаев Х. Х.</i> Предотвращение и прерывание града комбинированным методом «реагент плюс искусственно инициируемые молнии»	19
<i>Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Егоров И. М., Калишин А. С.</i> Явления в высокоширотной F-области ионосферы при одновременном воздействии мощными КВ радиоволнами O- и X-поляризации	27
<i>Борисов А. А., Кулешов Ю. В., Маков А. Б.</i> Метод оценивания эффективности прогнозирования гидрометеорологических условий при обеспечении действий войск	33
<i>Булкин В. В., Михеева С. А.</i> Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха обработанными газами автотранспорта на участке магистральных улиц города Мурома	39
<i>Бунина Ю. Е.</i> Метод оценивания влияния гидрометеорологических условий при коррекции ИК-изображений объектов и фонов в условиях их естественной изменчивости	47
<i>Бунина Ю. Е., Летучий Ю. А.</i> Модель оценивания контрастов радиационных температур объектов и фонов на местности	54
<i>Бухаркин С. А., Григорьева О. В., Мочалов В. Ф., Шкуров Н. В.</i> Комплексная модель оценивания состояния земель на основе обработки материалов мультиспектральной космической съемки и данных наземных обследований	60
<i>Готюр И. А., Коровин Е. А., Чернышев С. В., Щукин Г. Г., Юсупов И. Е.</i> Экспериментальная сеть датчиков мониторинга грозовой активности	66
<i>Григорьев А. Н., Дементьев Д. С., Зуев Л. Г.</i> Подход к улучшению качества данных дистанционного зондирования Земли с использованием генеративно-сопоставительной нейронной сети	75
<i>Давыдов С. А., Заблоцкий Р. А., Тимошук А. С.</i> Контроль состояния озонового слоя в Арктическом регионе с помощью метеорологических спутников	84

<i>Денисенков Д. А., Жуков В. Ю., Щукин Г. Г.</i> Экспериментальные радиолокационные исследования распределения амплитуды отражений от метеообразований	92
<i>Денисова В. И., Журавлев С. В., Котонаева Н. Г., Романов И. В., Цыбуля К. Г.</i> Развитие государственной системы мониторинга ионосферы в интересах обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации геофизической информацией	100
<i>Доронин А. П., Козлов С. И., Петроченко В. М., Филиппёнок В. В.</i> Искусственные атмосферные образования: методы и технические средства, области применения	108
<i>Доронин А. П., Петроченко В. М., Филиппёнок В. В.</i> Модель пространственно-временного распределения метеорологических условий в районе Среднего Урала применительно к проблеме создания искусственных туманов в целях решения экологических задач	116
<i>Иманова А. С., Смышляев С. П.</i> Исследование динамических факторов образования озоновых аномалий в полярных широтах	124
<i>Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т.</i> Прогноз града и оценка его размера на основе глобальной математической модели атмосферы	133
<i>Караваев Д. М., Лебедев А. Б., Моисеева Н. О., Щукин Г. Г.</i> Применение наземных СВЧ-радиометров для диагностики мезоструктуры атмосферных фронтов	141
<i>Коберник Д. А., Лукин В. В., Руденко В. В., Рыбин И. А.</i> Крупномасштабные ионосферные возмущения, обусловленные инъекцией продуктов горения от работы двигателей стартующих ракет	147
<i>Колесников Е. В.</i> Развитие информационной системы архивного хранения Госфонда Росгидромета	157
<i>Корыстин А. А., Кулешов Ю. В.</i> Геофизическое обеспечение применения радиолокационных и радионавигационных систем и средств	167
<i>Костромитинов А. В., Яременко И. А.</i> Метод прогнозирования тумана с использованием сверточных нейронных сетей	186
<i>Лебедев Н. В., Лесик Н. П., Лукин В. В., Назаров С. А., Никольский В. А., Руденко В. В.</i> Математический аппарат численного моделирования распространения радиоволн в пространственно-неоднородной ионосферной плазме	194
<i>Летучий Ю. А.</i> Индикаторы химического загрязнения морей России	202
<i>Лобынцев В. В., Максимов М. В., Мухаметшин И. Т.</i> Современные проблемы и решения по обеспечению экологической безопасности кораблей и судов Военно-Морского Флота	207

<i>Нагорский П. М., Пустовалов К. Н., Смирнов С. В.</i> Суточные и сезонные вариации невозмущенного электрического поля и их связь с изменчивостью геофизических величин на юге Западной Сибири	213
<i>Рослов Л. Д., Семенов В. В., Чувирова К. И.</i> Метод оценивания характеристик прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне в районах, не освещенных данными метеорологических наблюдений	223
<i>Ростокин И. Н., Ростоккина Е. А., Федосеева Е. В., Щукин Г. Г.</i> Перспективы модернизации многочастотных СВЧ радиометрических систем дистанционного зондирования атмосферы при введении оптического канала передачи информации	229
<i>Шулейкин В. Н., Щукин Г. Г.</i> Использование элементов приземного атмосферного электричества в задачах прикладной геофизики	236
<i>Ясюкевич Ю. В.</i> Потенциал глобальных навигационных спутниковых систем для обеспечения информацией об эффектах космической погоды	245
Рефераты статей	252
Сведения об авторах	261
Сведения о рецензентах	267

О. Г. Анискина*,
кандидат физико-математических наук, доцент;

В. В. Стогниева**,
Н. Б. Толстоброва**,

*Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург.

**Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

ПРОГНОЗ ГРОЗ С ПОМОЩЬЮ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Представлены результаты расчетов индексов грозовой активности по данным, полученным с помощью гидродинамического прогноза. Проведен численный эксперимент по моделированию грозовой ситуации с использованием физико-статистических и гидродинамических методов прогнозирования. Проанализированы различные схемы параметризации конвекции в мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW. Проведена количественная и качественная оценка соответствия прогностических полей высокой вероятности возникновения гроз с фактическими данными метеорологических радиолокаторов (МРЛ).

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, параметризация конвекции, прогноз опасных явлений погоды, индекс грозовой активности.

ВВЕДЕНИЕ

Для прогноза грозовой деятельности существуют различные физико-статистические параметры неустойчивости атмосферы, для расчета которых используются фактические данные температуры воздуха, температуры точки росы, направление и скорость ветра на стандартных изобарических поверхностях и другие метеорологические величины. Для расчета некоторых индексов неустойчивости требуется построение аэрологических диаграмм, что связано с определенными временными затратами. В последнее время для повышения оперативности прогнозов и экономии времени создаются программы для автоматического расчета индексов неустойчивости по данным гидродинамических моделей атмосферы [1, 2].

В синоптической практике для прогноза гроз активное применение получил метод Вайтинга, основанный на использовании индекса грозовой активности K . Для расчета K -индекса необходимо знать значения температуры на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа, а также температуру точки росы на поверхностях 850 и 700 гПа [3]. При использовании этих данных с карт температурно-ветрового зондирования заблаговременность прогноза составляет, как правило, не более 12 ч. В связи с этим, в целях повышения заблаговременности прогноза грозы, был проведен численный эксперимент по расчету индекса грозовой активности методом Вайтинга с использованием не фактических данных, а модельных данных, полученных в результате гидродинамического прогноза.

ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В численном эксперименте моделировалась грозовая ситуация, наблюдавшаяся в Ленинградской области 15 августа 2021 года. В Санкт-Петербурге гроза была отмечена в Курортном, Кронштадтском, Приморском и Петродворцовом районах с 17:50 до 20:55 по местному времени (рис.1,а). Данные грозопеленгации от 15:30 ВСВ 15.08.2021 г. представлены на рис. 1,б. На фрагменте комплексной карты погоды и данных МРЛ за 15:00 ВСВ 15.08.2021 г. указаны наблюдавшиеся на метеорологических станциях грозы и область возможной грозовой активности по данным радиолокационных станций, протянувшаяся от Санкт-Петербурга

до Чудского озера (рис. 2,а). Эту же область можно наблюдать на карте явлений погоды ДМРЛ-С п. Воейково от 15:30 ВСВ 15.08.2021 г. (рис. 2,б) [4].

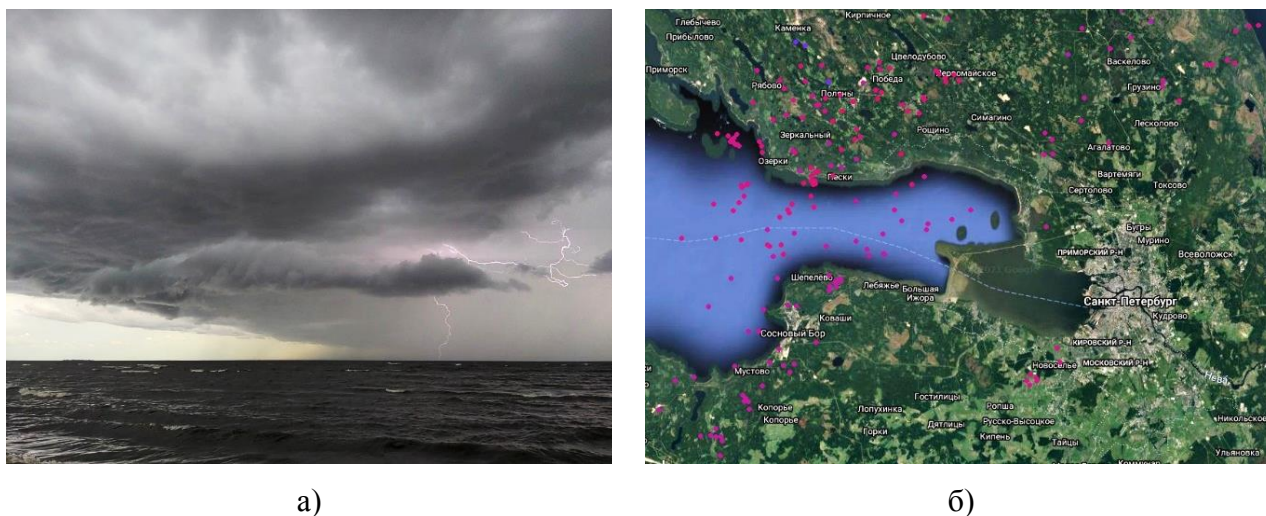


Рис. 1. Гроза над Финским заливом 15 августа 2021 г. (а); данные грозопеленгации от 15:30 ВСВ 15.08.2021 г. (б)

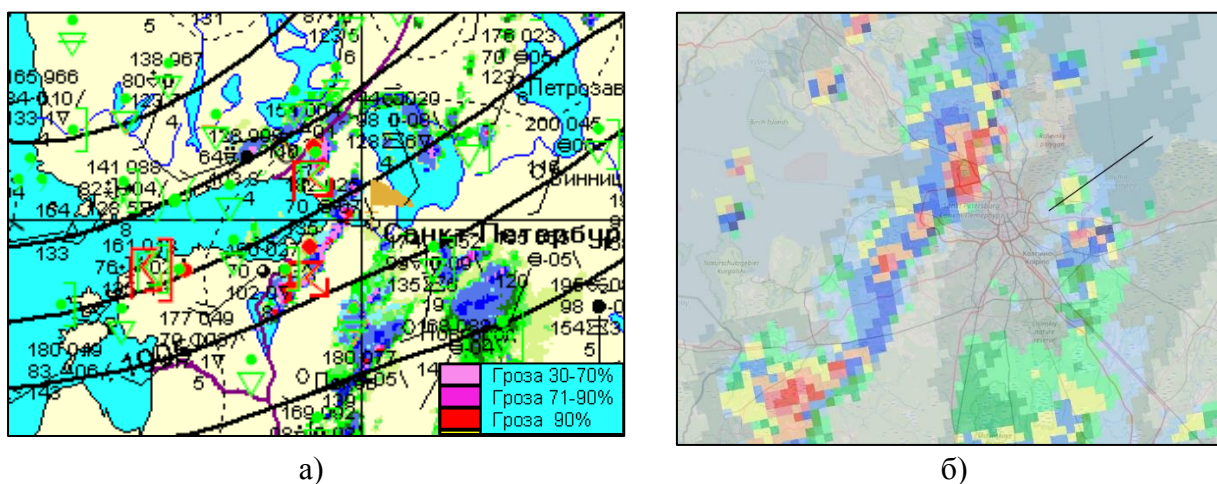


Рис. 2. Фрагмент комплексной карты погоды и данных МРЛ за 15:00 ВСВ 15.08.2021 г. (а); данные ДМРЛ-С п. Воейково от 15:30 ВСВ 15.08.2021 г. (б)

Моделирование выполнялось с помощью мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW. Задачей моделирования являлось получение распределения индекса грозовой активности по методу Вайтинга, максимально приближенное к фактическим данным комплексной карты погоды и данным МРЛ. Для расчета индекса использовались прогностические данные температуры воздуха и температуры точки росы, полученные с помощью гидродинамического прогноза с заблаговременностью 21 ч. Моделирование выполнялось в нескольких вариантах с применением различных схем параметризации конвекции с целью выбора наиболее оптимальной конфигурации модели.

Расчетная область представляет собой прямоугольник 645×745 км в декартовой системе координат, в центре которого находится город Санкт-Петербург (рис. 3). Шаг сетки по горизонтали – 5 км, по оси x расположено 130 расчетных узлов, по оси y – 150. По вертикали расчеты производились на 34 уровнях с последующим интерполированием результатов на



Рис. 3. Расчетная область
(центр области –
г. Санкт-Петербург)

стандартные изобарические поверхности. Шаг по времени составил 30 с. Данные на начало прогноза и для граничных условий брались из глобальной модели GFS (NCEP). Результаты сохранялись и выводились каждый час в течение времени прогноза.

Индекс грозовой активности K по методу Вайтинга рассчитывался с помощью дополнительной программы по формуле

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}),$$

где $T_{850}, T_{700}, T_{500}$ – прогностическая температура воздуха на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа соответственно;

T_{d850} и T_{d700} – прогностические значения температуры точки росы на поверхностях 850 и 700 гПа, полученные в результате гидродинамического прогноза по модели WRF-ARW.

Для построения полей распределения K -индекса использовался пакет визуализации метеорологической информации GrADS.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В результате эксперимента были получены восемь вариантов прогноза грозовой деятельности на 15:00 ВСУ 15 августа 2021 года. Поля распределения K -индекса, полученные при использовании различных параметризаций конвекции представлены на рис. 4–6. Критерием качественной оценки при выборе наиболее эффективной схемы параметризации являлось соответствие областей распределения индекса грозовой активности со значениями $K \geq 30$ данным МРЛ с вероятностью грозы более 70%. Если учесть, что все схемы явно завышают показатель грозовой активности в левом верхнем углу расчетной области (в месте нахождения центра циклона), возможно, из-за влияния граничных условий, данному критерию удовлетворяют три схемы. Схема Беттса – Миллера – Янича (рис. 5,б) дает прогноз грозы во всех областях, отмеченных на картах явлений погоды МРЛ, но при этом сильно увеличивает площадь возможных гроз. Схема Тидке (рис. 6,а) хорошо дает прогноз грозы над Санкт-Петербургом, но завышает показания над Ладожским озером. Новая схема Тидке (рис. 6,б) показывает грозу над Санкт-Петербургом и в западной части Ленинградской области, но увеличивает возможную грозовую область над Финским заливом.

Для оценки успешности прогноза грозовой активности по модели WRF проводилось количественное сопоставление полученных полей распределения K -индекса с показаниями МРЛ. Центральная область расчетной сетки была поделена на девять квадратов равной площади, имеющих географическую привязку к карте погоды и данным МРЛ (рис. 7). В каждом квадрате определялась оправдываемость прогноза грозы в 0, 50 и 100% в зависимости от долей совпадения по площади областей предполагаемых гроз по K -индексу и по данным МРЛ. Если доля площади квадрата, соответствующая высоким показателям грозовой активности (или отсутствию грозы), совпадала и на схеме распределения K -индекса, и на карте явлений погоды МРЛ, то оправдываемость по данному квадрату бралась 100%. Если в равных долях по площади квадрата были показаны разные результаты наличия (отсутствия) грозы – 0%. В остальных случаях оправдываемость прогноза принималась 50%. Затем для каждой схемы параметризации конвекции рассчитывалось среднее арифметическое значение оправдываемости прогноза по территории P , % [4].

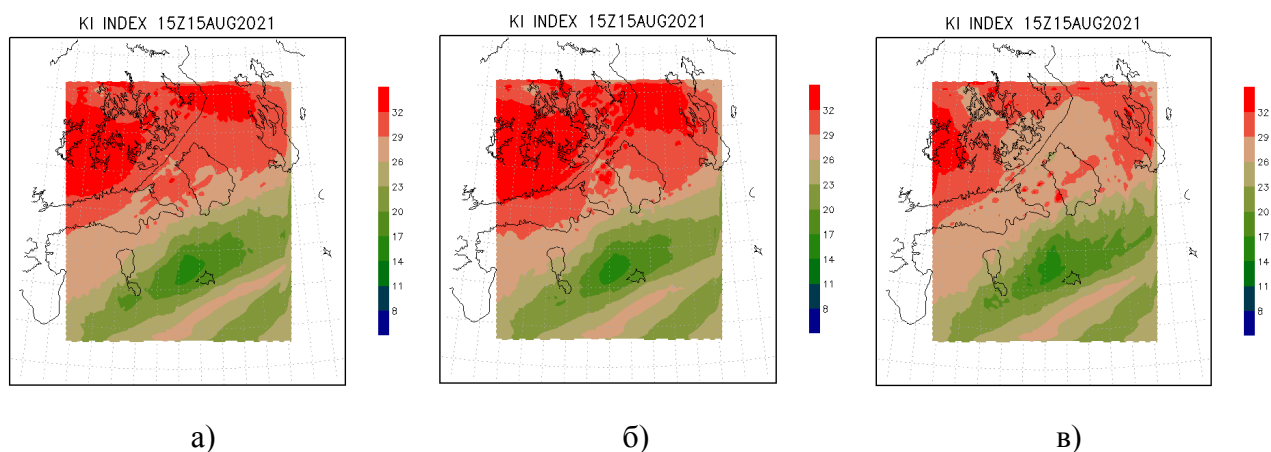


Рис. 4. Распределение К-индекса с использованием схемы:
 а – Каина – Фритша; б – многомасштабной схемы Каина – Фритша;
 в – схемы Занга – Мак-Фарлана

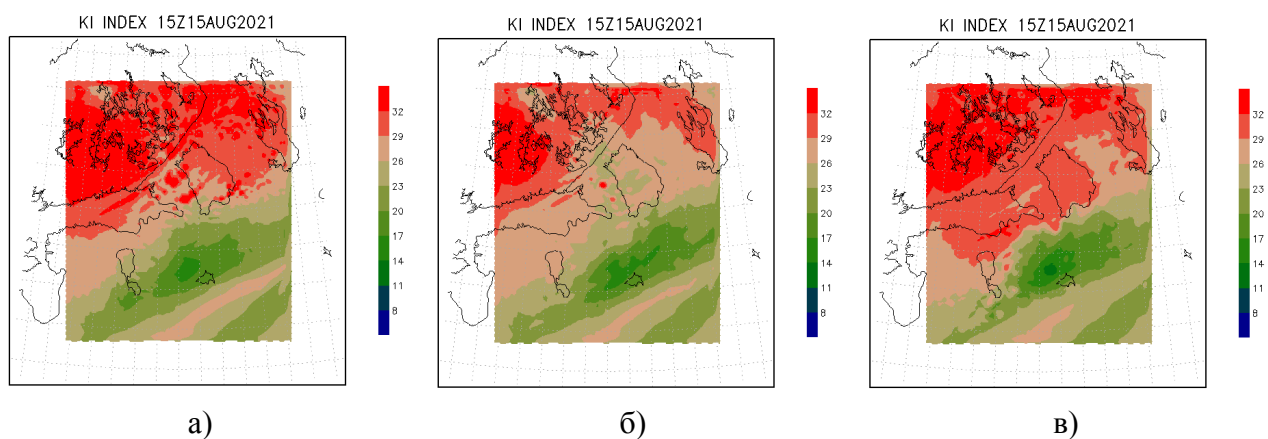


Рис. 5. Распределение К-индекса с использованием ансамблевой схемы:
 а – Грелла – Фрейтаса; б – Грелла 3D; в – Беттса – Миллера – Янича

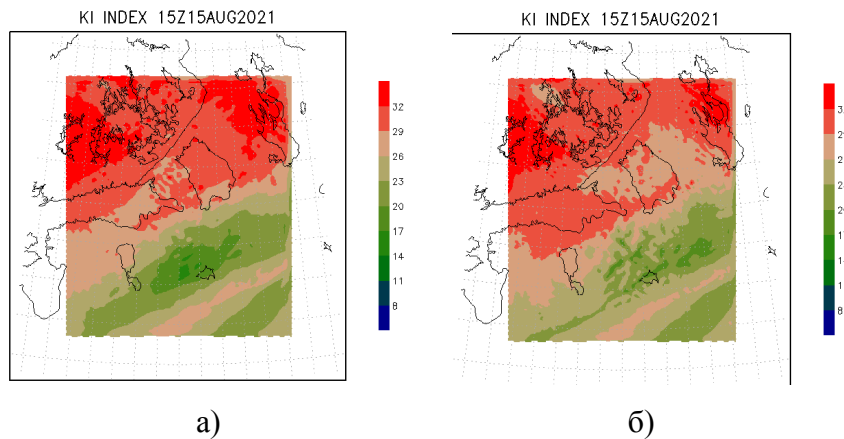


Рис. 6. Распределение К-индекса с использованием:
 а – схемы Тидке; б – новой схемы Тидке

Результаты успешности прогноза грозовой активности по модели WRF с использованием различных схем параметризации конвекции представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка успешности прогноза грозовой активности по модели WRF с использованием различных схем параметризации конвекции



Рис. 7. Область для расчета оправданности прогноза грозы

№	Название схемы параметризации конвекции	P, %
1	схема Каина – Фритша	66,7
2	многомасштабная схема Каина – Фритша	50,0
3	схема Занга – Мак-Фарлана	66,7
4	ансамблевая схема Грелла – Фрейтаса	61,1
5	ансамблевая схема Грелла 3D	50,0
6	схема Беттса – Миллера – Янича	77,8
7	схема Тидке	83,3

При количественном сравнении наиболее успешными оказались прогнозы с использованием параметризаций Тидке и Беттса – Миллера – Янича, которые были отмечены как лучшие и при качественном анализе. Лучший результат при прогнозе грозы с помощью модели WRF на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области получился при использовании новой схемы Тидке (табл. 1). В численном эксперименте была спрогнозирована единичная грозовая ситуация, поэтому полученные результаты требуют дополнительной проверки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования расчетов индексов грозовой активности по прогностическим данным гидродинамической модели позволили сделать следующие выводы:

- прогноз гроз физико-статистическими методами можно осуществлять с заблаговременностью порядка суток, используя для расчетов прогностические данные мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARV;
- для прогноза грозы методом Вайтинга на сетке в 5 км предпочтительнее в модели WRF-ARV использовать новую параметризацию Тидке для района Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Список используемых источников

1. Гусейнов Н. Ш., Агаева А. А. Применение индексов неустойчивости атмосферы к оперативному прогнозированию грозы на основе модельных данных // Ученые записки РГГМУ. – 2019. – № 56. – С. 30–37.
2. Быков А. В., Шихов А. Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 213–224.
3. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
4. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – 66 с. – URL: meganorm.ru/Data2/1/4293728/4293728668.html (дата обращения: 26.05.2022).

А. В. Баранюк*;
В. П. Кулешов*;
Л. М. Митник*;
доктор физико-математических наук, профессор;
М. Л. Митник*;
кандидат технических наук;
М. А. Панфилова**

*Тихоокеанский океанологический институт
имени В. И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток.

**Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики» РАН,
г. Нижний Новгород.

МОНИТОРИНГ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ СО СПУТНИКОВ «АРКТИКА-М» № 1, GCOM-W1, GPM, «МЕТЕОР-М» № 2-2, MetOp И AQUA

Рассмотрены возможности слежения за процессами и явлениями в атмосфере и на поверхности в Арктическом регионе. Такое слежение осуществляется на основе изображений в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн со спутника «Арктика-М» № 1 и данных микроволнового пассивного и активного зондирования, которые получают с семейства низкоорбитальных спутников различных стран. Приведены примеры совместного анализа данных, обеспечивающих получение количественных сведений о пространственно-временной изменчивости полей гидрометеорологических параметров, которые могут быть применены при решении задач оперативного мониторинга и в научных исследованиях полярных областей Земли.

Ключевые слова: «Арктика-М» № 1, микроволновые радиометры, радары, опасные явления, штормовой ветер, облачность, Северный морской путь (СМП), мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Специфика Арктического региона обуславливает необходимость широкого использования данных спутникового дистанционного зондирования для получения оперативной и научной информации о состоянии и изменчивости характеристик поверхности и атмосферы. В феврале 2021 года на высокоэллиптическую (ВЭ) орбиту был запущен космический аппарат (КА) «Арктика-М» № 1 с многоканальным сканирующим устройством гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГС), которое принимает излучение поверхности Земли и облачности в 10 спектральных каналах, в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах [0]. При этом МСУ является оперативным источником данных о динамических процессах в окружающей среде с временным разрешением 15–30 мин. В 2023 году запланирован запуск второго космического аппарата «Арктика-М». В последующие годы к ним добавятся еще два спутника, что должно повысить временное разрешение данных зондирования и обеспечить слежение за быстро протекающими процессами в атмосфере и океане, а также над материковыми покровами.

При мониторинге поверхности необходимы количественные значения параметров океана, ледяного и материковых покровов независимо от освещенности и облачности. К ним относятся скорость приводного ветра, температура поверхности океана (ТПО), положение кромки, сплоченность и типы льда, характеристики его дрейфа, площадь зон таяния материковых льдов, тип и интенсивность твердых и жидких осадков, содержание в облаках капельной влаги и водяного пара в атмосфере и др. Серьезным ограничением при решении этой задачи является облачность, вероятность которой в Арктике достигает 80%. Сведения о параметрах поверхности при облачности в последние 10–15 лет надежно определяются по данным микроволновых (МВ) сканирующих радиометров, скаттерометров и радаров различных типов,

поступающим с низкоорбитальных спутников различных стран, большинство которых находится в открытом доступе.

Ниже представлены результаты совместного анализа явлений и процессов в системе атмосфера – океан с использованием видимых и ИК изображений со спутников «Арктика-М» № 1, Terra, Aqua и SNPP и МВ измерений со спутников GCOM-W1, GPM, «Метеор-М» № 2-2, SNPP, MetOp-A и др., наземных и радиозондовых наблюдений, карт погоды и данных моделирования переноса излучения. Часть результатов была ранее представлена в ИКИ РАН [2].

СПУТНИКИ, ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Космический аппарат (КА) «Арктика-М» № 1, предназначенный для гидрометеорологических измерений арктического региона, был запущен на высокоэллиптическую орбиту (ВЭО) 28 февраля 2021 года. Основная задача спутника – получение данных об атмосфере и поверхности океана, морских льдов и суши. Параметры орбиты следующие: высота апогея 39400 км, высота перигея 1000 км, наклонение 63,3°, период обращения 12 ч. Рабочие участки орбиты начинаются за 3,2 ч до прохождения апогея и заканчиваются через 3,2 ч после его прохождения. Во время рабочих отрезков бортовые приборы дистанционного зондирования наблюдают за полярной областью Земли каждые 15–30 мин (рис. 1,а).

Многоканальное сканирующее устройство (МСУ) принимает излучение Земли в трех видимых спектральных диапазонах (0,5–0,65, 0,65–0,8 и 0,8–0,9 мкм) и в семи ИК диапазонах (3,5–4,01, 5,7–7,0, 7,5–8,5, 8,2–9,2, 9,2–10,2, 10,2–11,2 и 11,2–12,5 мкм) [1]. Пространственное разрешение видимых каналов составляет 1 км, инфракрасных – 4 км. Первое цветное изображение Земли, полученное путем синтеза трех спектральных видимых каналов, показано на рис. 1,б.

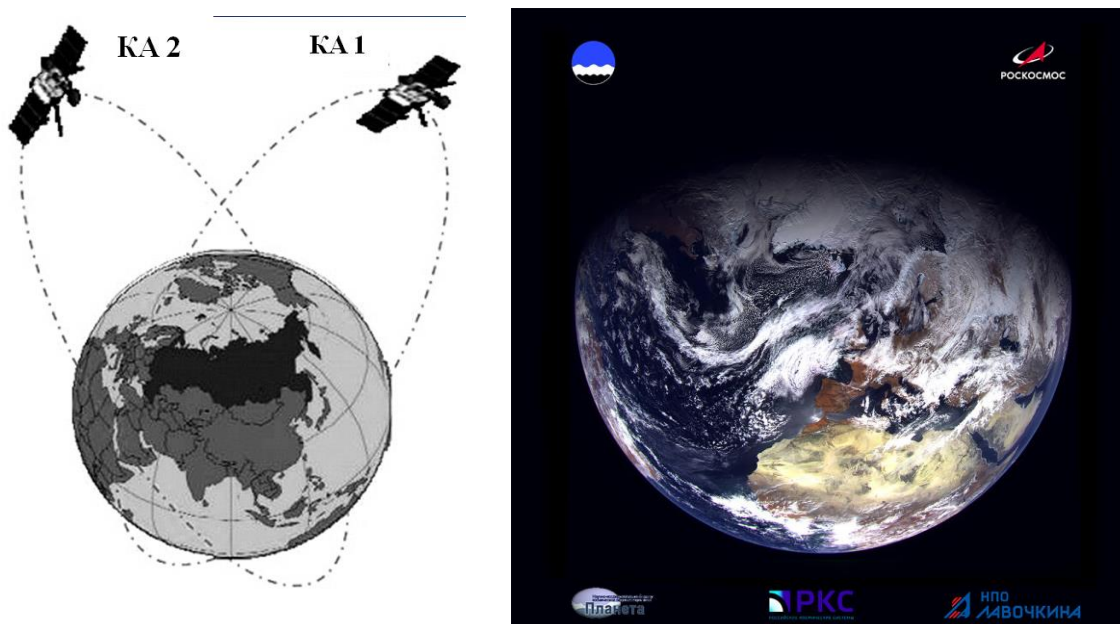


Рис. 1. Высокоэллиптические орбиты космических аппаратов «Арктика-М» № 1 и № 2 (а) и цветосинтезированное изображение в трех видимых спектральных каналах (б), полученное 22 марта 2021 года

На изображении видны Гренландия, Исландия, Скандинавский и Кольский полуострова, облачность атмосферных фронтов и циклонов, мезомасштабные конвективные ячейки

южнее Гренландии и другие детали. Контрасты на ИК спектральных изображениях зависят от температуры подстилающей поверхности (земных покровов и облачности), от температуры и влажности воздуха, содержания в атмосфере озона и аэрозолей.

Конкуренцию с оптическими данными спутника «Арктика-М» составляют хорошо калиброванные видимые изображения и ИК-изображения с более высоким спектральным разрешением, получаемые с низкоорбитальных спутников. В частности, спектрорадиометр MODIS (спутники Terra и Aqua) с 1999 года принимает уходящее излучение Земли в 31 спектральном канале. Пространственное разрешение в видимом диапазоне – 250 м, в ИК-диапазоне – 1 км. Полоса обзора шириной 2330 км обеспечивает высокое временное разрешение за счет перекрытия полос двух соседних орбит. Изображения и примерно 100 продуктов их обработки находятся в свободном доступе. Мозаика видимых изображений за 23 марта показана на рис. 2.

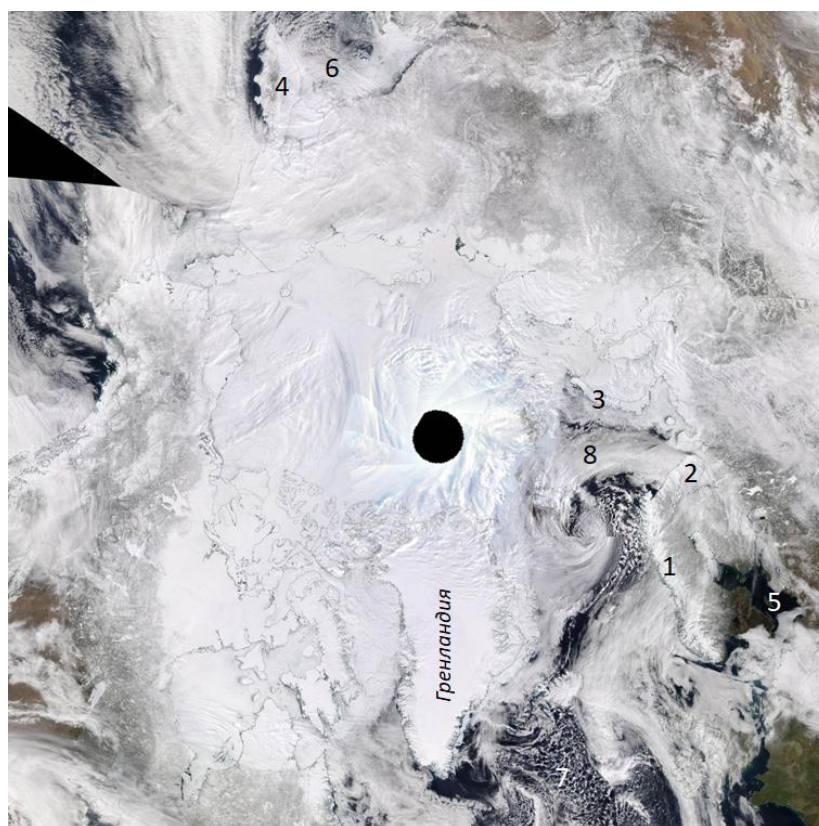


Рис. 2. Облачный покров по данным MODIS (спутник Aqua) 23.03. 2021 года:
1 – Скандинавский п-ов; 2 – Кольский п-ов; 3 – Новая Земля; 4 – Камчатка;
5 – Балтийское море; 6 – Охотское море; 7 – вторжение холодного воздуха;
8 – циклон

При проведении работ в Арктике, связанных с транспортировкой грузов Северным морским путем, с северным завозом, геологоразведкой и др., необходимы обновляемые сведения о гидрометеорологической обстановке и особенно важные – об опасных явлениях: сильном ветре, штормовом волнении, интенсивных осадках, сплоченности и других характеристиках морского льда. Основным источником количественной информации об опасных атмосферных явлениях и процессах служат пассивные и активные измерения в МВ-диапазоне с российских и зарубежных низкоорбитальных (НО) спутников. При этом пассивные измерения выполняются сканирующими многоканальными радиометрами AMSR2 (спутник GCOM-W1), GMI (GPM), AMSU-A,-B (NOAA-18, Aqua), ATMS (SNPP и NOAA-20), МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2–2) и др. Активное зондирование проводится скаттерометрами ASCAT

температурой и влажностью воздуха в средней тропосфере и зависит от характеристик рассеивающей среды, что в сочетании с восстановленными значениями параметров W , Q и V по измерениям на других частотах радиометра обеспечивает более глубокий анализ синоптического процесса [7].

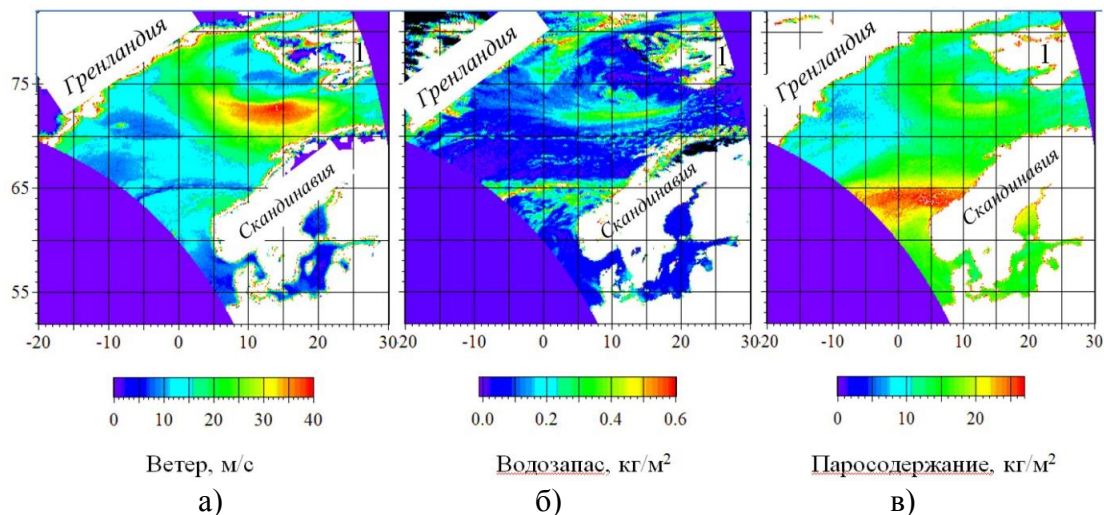


Рис. 4. Поля приводного ветра (а), водозапаса облаков (б) и паросодержания атмосферы (в) над Гренландским и Норвежским морями, восстановленные по данным AMSR2 за 23 марта 2021 года по алгоритму [3], где 1 – Шпицберген

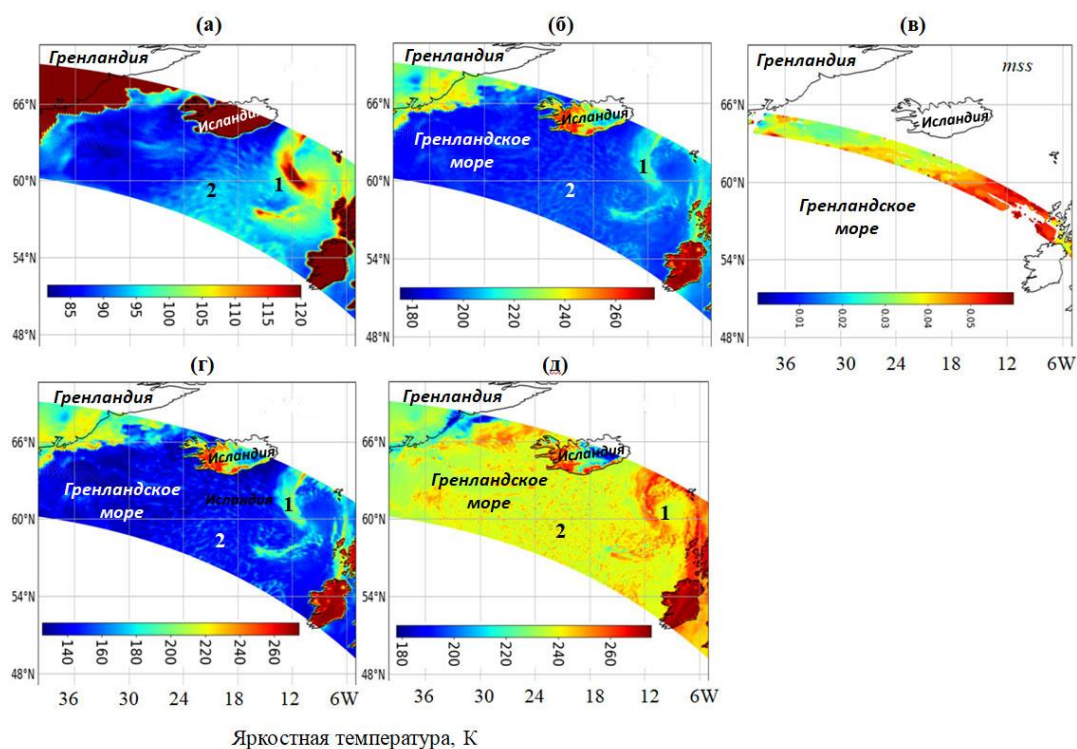


Рис. 5. Циклон 1 и мезомасштабные конвективные ячейки в области вторжения холодного воздуха 2 в полях яркостных температур на Г-поляризации (а, г) и В-поляризации (б, д) на частотах: 10,6 (а), 23,8 (б), 37 (г) и 89 ГГц (д), и среднеквадратичный уклон морской поверхности mss (в) по данным двухчастотного радара осадков (DPR)[6]

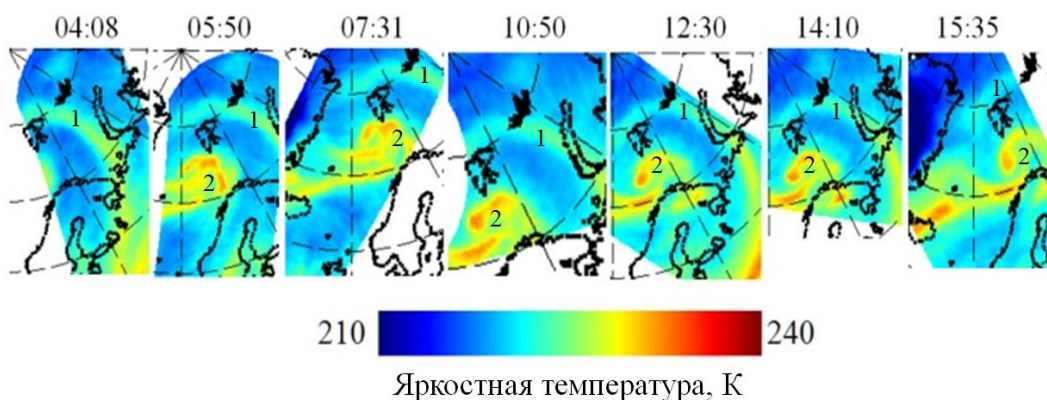


Рис. 6. Атмосферный фронт 1 и полярный циклон 2 в Норвежском и Баренцевом морях, измеренные МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 на частоте $183,31 \pm 1,4$ ГГц с 04:08 до 15:35 UTC 23 марта 2021 года

Спутниковые МВ радиометры и РСА являются основными источниками информации о ледяном покрове. По измерениям нескольких сканирующих радиометров начиная с 1978 года сформирована база данных о площади и сплоченности морского льда. Ежедневные данные о ледяном покрове в Северном и Южном полушариях и сопутствующие данные предоставляет National Snow and Ice Data Center (NSIDC) при университете Колорадо в Боулдере (США) (https://ru.frwiki.wiki/wiki/National_Snow_and_Ice_Data_Center). Карты сплоченности льда в Северном Ледовитом и Южном океанах и в морях Арктики с пространственным разрешением $6,25 \times 6,25$ км выпускает университет Бремена (Германия) (<https://seaice.uni-bremen.de/sea-ice-concentration/amsre-amsr2/>). При построении карт используются яркостные температуры, измеренные радиометрами AMSR-E (2003-2011) и AMSR2 (с 2012 года – по настоящее время) и оригинальные алгоритмы.

Детальные всепогодные сведения о распределении морского льда с разрешением от десятков до 100 м могут быть получены спутниковыми РСА. Спутниковые РСА осуществляют зондирование на различных поляризациях на волнах сантиметрового ($\approx 3-6$ см) и дециметрового (23 см) диапазонов, что повышает правильность интерпретации типов ледяного покрова и оценку скорости приводного ветра. На рис. 7 показаны перекрывающиеся полосы изображений РСА Баренцева моря, архипелага Новая Земля и ледяного покрова. РСА-изображения получены со спутника Sentinel-1A на ГГ-поляризации 22 марта 2021 года. Вариации яркости изображений открытых районов моря вызваны мезомасштабной изменчивостью приводного ветра при ячейковой и валиковой конвекции в пограничном слое атмосферы. Вариации яркости ледяного покрова зависят от типа льда, шероховатости его поверхности, заснеженности и других факторов.

Аналогичные сопоставления данных, полученных с высокоорбитального спутника «Арктика-М» № 1, с пассивными и активными МВ изображениями, полученными с низкоорбитальных спутников, были выполнены за другие даты в марте–мае, а также в ноябре 2021 года.

Несмотря на то, что спутник «Арктика-М» № 1 был принят в эксплуатацию 3 сентября, поступающие с него данные не обеспечивают мониторинг Арктического региона: в ноябре 2021 года практически во всех морях акватории СМП оказались заблокированы во льдах в итоге 18 судов [8]. Можно обоснованно предположить, что надежность мониторинга была бы заметно выше при использовании данных МВ зондирования, регулярно поступающих из космоса. Нельзя сбрасывать со счета и несогласованность действий ведомств, ответственных за эксплуатацию СМП. Так, в [8] основными причинами чрезвычайной ситуации называют

запаздывание прогноза на две недели (!) и отсутствие ледоколов, которые были зафрахтованы для решения других задач.

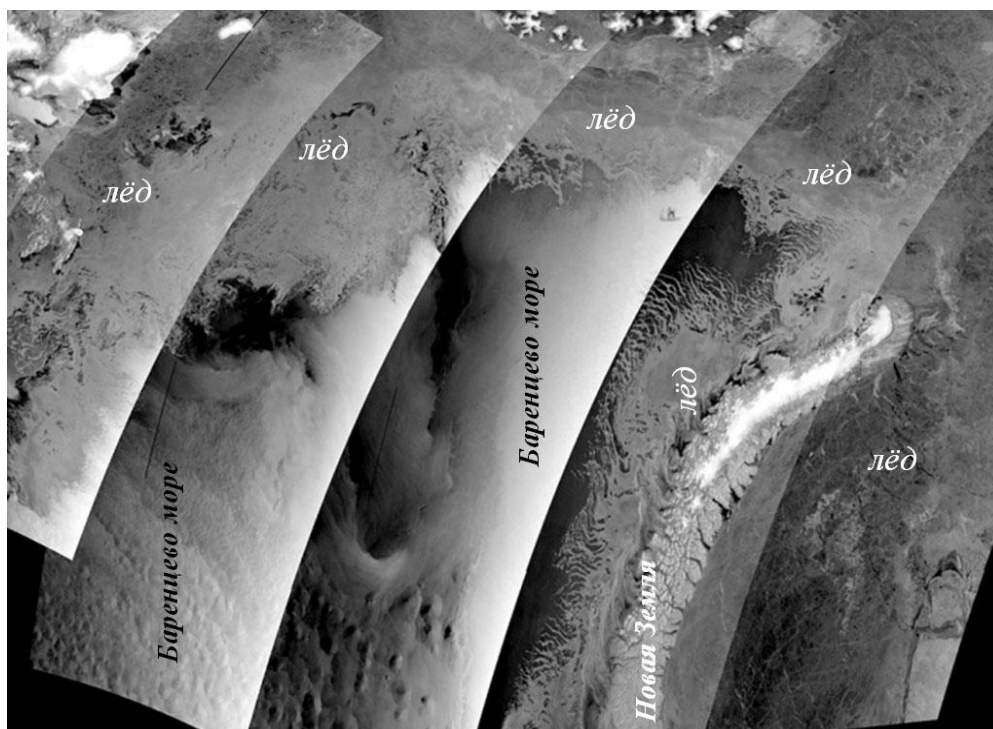


Рис. 7. Баренцево море, архипелаг Новая Земля и морской лёд на нескольких полосах изображений РСА с ГГ-поляризацией, полученных со спутника Sentinel-1A, 22 марта 2021 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирован подход к проведению мониторинга Арктического региона, основанный на совместном использовании видимых изображений и ИК-изображений с высокоорбитального спутника «Арктика-1М» и данных с семейства низкоорбитальных российских и зарубежных спутников, оснащенных спектрорадиометрами видимого и ИК-диапазонов, а также пассивными и активными микроволновыми сенсорами. На примерах показаны целесообразность и высокая эффективность сочетания оптических и микроволновых данных при анализе явлений и процессов в Арктике. Большая часть данных находится в открытом доступе. Подход обеспечивает:

- получение данных о состоянии подстилающей поверхности и атмосферы над обширным регионом с высоким пространственным и временным разрешением;
- оперативность получения информации независимо от облачности и времени суток;
- получение количественной информации об опасных природных явлениях и их эволюции путем применения разработанных алгоритмов восстановления параметров к данным зондирования с низкоорбитальных спутников.

Анализ полученных временных рядов микроволновых спутниковых и сопутствующих гидрометеорологических измерений (показаний гидрометеостанций, карт погоды, данных радиозондирования атмосферы и др.) может служить основой для совершенствования алго-

ритмов обработки комплексных данных, предназначенных для решения как оперативных, так и научных задач, связанных, в частности, с запуском новых спутников.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 20-17-00179).

Список используемых источников

1. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» / В. В. Асмус [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 12. – С. 11–26.

2. Мониторинг Арктического региона со спутников «Арктика-1М», GCOM-W1, GPM, «Метеор-М» № 2-2, Sentinel-1A и Aqua по измерениям в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах / Л. М. Митник [и др.] // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. 15–19 ноября 2021 г. – М.: ИКИ РАН, 2021. – С. 41. – DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.

3. *Mitnik L. M., Mitnik M. L., Zabolotskikh E. V.* Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E // *J. Remote Sensing Society of Japan.* – 2009. – Vol. 29, № 1. – P. 156–165.

4. Моделирование яркостных температур и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 / Г. М. Чернявский [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 3. – С. 51–65. – DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.

5. *Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L.* Microwave radiometer MTVZA-GY on new Russian satellite Meteor-M No 2-2 and sudden stratospheric warming over Antarctica // *IEEE J. Select. Topics Appl. Rem. Sens.* – 2021. – DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3133425.

6. *Panfilova M., Karaev V.* Wind speed retrieval algorithm using Ku-band radar onboard GPM satellite // *Remote Sensing.* – 2021. – Vol. 13. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs13224565> (дата обращения: 20.07.2022).

7. *Chen R., Bennartz R.* Sensitivity of 89–190-GHz microwave observations to ice particle scattering // *J. Appl. Meteor. Climat.* – 2020. – Vol. 159. – С. 1194–2015. – DOI: 10.1175/JAMC-D-19-0293.1

8. *Афонин А. Б.* «Ледовая блокада» на Севморпути осенью 1 февраля 2021 года // Северный морской путь. Транспорт и логистика. – 2022. – URL: <https://goarctic.ru/work/ledovaya-blokada-na-sevmorputi-osenyu-2021-goda/> (дата обращения: 20.07.2022).

М. Н. Бейтуганов*,

доктор физико-математических наук;

Х. Х. Чочаев*,

кандидат физико-математических наук

*Северо-Кавказская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы, г. Нальчик.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ И ПРЕРЫВАНИЕ ГРАДА КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ «РЕАГЕНТ ПЛЮС ИСКУССТВЕННО ИНИЦИИРУЕМЫЕ МОЛНИИ»

В статье предлагается комбинированный («реагент плюс искусственно инициированная молния») метод воздействия на градогрозовые облака с целью предотвращения образования и выпадения града. Представлено физическое обоснование метода, и приводятся результаты предварительного натурного эксперимента по воздействию на градогрозовые облака противоградовыми ракетами «Алазань-6» с токопроводящей поверхностью. Указывается, что предлагаемый в работе метод может быть использован на практике для защиты от молний и града различных объектов на земле: стартовых комплексов ракет-носителей, атомных электростанций, крупных электrorаспределительных подстанций, ценных лесонасаждений, ограниченных площадей – садов, плантаций табака, винограда; теплиц и т. д.

Ключевые слова: комбинированный метод, градогрозовое облако, град, токопроводящая поверхность, воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

Основным механизмом существующего метода предотвращения града [1] является удаление из возможной зоны роста града водности преждевременно вызываемыми осадками по цепочке: частица кристаллизующего реагента (ЧКР) – образование кристаллов – их рост при столкновениях с другими кристаллами и капельками – выпадение в виде преждевременных осадков. За этот достаточно длительный процесс (до десятков минут и более) в зоне роста града не должны наблюдаться значения водности, величины которых могли бы обеспечить рост града. Вместе с тем ЧКР, по этому методу, также могут способствовать образованию дополнительных зародышей града, которые, конкурируя с естественными зародышами града, приведут к уменьшению размеров градин. Ранее теория конкуренции вновь образующихся под воздействием ЧКР дополнительных зародышей града при их концентрации 10^5 м^{-3} была физической основой предотвращения града [2].

Совершенствование существующих методов предотвращения града должно учитывать следующее обстоятельство. Измеренные радиолокационным способом концентрации градин в грозоградовом облаке составляют порядка $2\text{--}60 \text{ м}^{-3}$ [3]. Экспериментально установлено, что капельные и крупяные зародыши града формируются в интервале значений температур от минус 2°C до минус 15°C и что они образуются на крупных частицах микропримеси атмосферы (ЧМА) с размерами от 2 до 60 мкм и более [3], которые условно разделены на гигантские (с размерами 2-3 мкм) и сверхгигантские (с размерами 30-60 мкм и более) аэрозольные частицы, т. е. на ГАЧ и СГАЧ. Капельные зародыши образуются на СГАЧ при средних температурах минус $5,7^{\circ}\text{C}$, а крупяные зародыши – на ГАЧ при средних температурах минус $10,3^{\circ}\text{C}$. Измеренные с самолета [3] концентрации крупных ЧМА в предшествующие градобитию дни достигают значений $10^4\text{--}10^5 \text{ м}^{-3}$. Допуская, что формирование зародыша града происходит на ГАЧ и СГАЧ, и сравнивая их концентрации с реальными концентрациями

градин в облаке, видим, что только тысячная доля крупных ЧМА превращается в зародыши града. Учитывая, что размеры ЧКР составляют 0,1 мкм и менее [3], можно допустить, что их роль при воздействии существующим методом предотвращения града сводится к превращению водности облака в лёдность и тем самым к уменьшению размера растущих градин.

МОЛНИИ, ОСАДКИ, ЗАРОДЫШИ ГРАДА И ЭЛЕКТРОАКТИВНЫЕ ЗОНЫ

Роль молниевых разрядов в формировании осадков и града исследовалась во многих работах [2–4]. Образование града в грозовом облаке происходит после начала молниевых разрядов, и абсолютное большинство градовых процессов сопровождаются видимыми или слышимыми молниевыми разрядами [4]. Более того, в зависимости от региона грозовые явления перерастают в град с соотношением 5:1, а на территориях Кабардино-Балкарской Республики (КБР), Карачаево-Черкесской республики (КЧР) и Республики Северная Осетия (РСО) Алания – 3:1 [5].

Исследование связи процессов осадкообразования с молниевыми разрядами, выполненное в работе [6], позволило установить, что на один молниевый разряд приходится около 10^4 м³ (или 10 т) воды. Тесная взаимосвязь между молниями и осадками выявлена также в работе [7] при исследовании роста интенсивности осадков 60 осадкомерами на площади около 600 га. Установлено, что после молниевых разрядов, за 2 мин до выпадения града на небольшой площади, интенсивность осадков, измеряемая одним из осадкомеров, возросла с 2 до 64 мм/час.

Превращению мощно-кучевого облака в грозовое предшествует электризация облачных частиц с образованием электроактивных зон – ячеек. В грозовых и градовых облаках такие ячейки имеют размеры от десятков метров до одного и более километров. Наибольшее количество зон (до 26%) в грозовых облаках имеют размеры порядка 200–400 м [8]. На основании самолетных измерений, представленных в работе [9] при горизонтальном полете протяженностью около 8 км и на высоте порядка 6 км, в грозовом облаке было обнаружено до 8-9 зон сосредоточения положительных объемных зарядов. В одной грозе было обнаружено до 8 электроактивных зон размерами до 2-3 км [10]. Были также обнаружены мультитячейки с максимальными значениями напряженности электрического поля на высотах 6 и 11 км с отражаемостью около 50 dBZ [11]. Диаметры таких областей могут достигать около 2 км, а зон неоднородностей – от 100 м и более [11].

В электроактивных ячейках грозового облака растут частицы осадков и град. Основным местоположением электроактивных зон считается область, представляющая собой облако между верхним +P зарядом и нижним – N зарядом, расстояние между центрами которых около 2-3 км. Роль электрических полей в электроактивных зонах в росте частиц осадков подчеркивается И. М. Именитовым [12]: условия роста частиц в средах, где водность 1 кг/м³ и напряженность $E=0$, и в среде, где водность 1 г/м³ и $E=1$ кВ/см, одинаковы. Что касается формирования зародышей града в грозовом облаке, отметим следующее. Крупные ЧМА могут попасть в атмосферу при высоких значениях температуры на земной поверхности, вызывающих большие скорости восходящих потоков. Превращение ГАЧ и СГАЧ в крупные и капельные зародыши града связывают с началом электроразрядных явлений [13]. Это такие явления, как стримерно-лидерные разряды, внутриоблачные и наземные молнии. Все типы молний внедряют в облачное пространство избыточный объемный заряд (ИОЗ) с концентрациями ионов 10^{17} м⁻³. Одни молнии инициируют отрицательный, а другие – положительный объемные заряды. В результате на ГАЧ и СГАЧ начинают оседать избыточные заряды, концентрации которых определяются следующими выражениями [14]:

$$n1 = \frac{dkT}{2e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi dcNe^2t}{2kT} \right), \quad (1)$$

$$n2 = \frac{3\varepsilon d^2E}{4(\varepsilon + 2)e}, \quad (2)$$

где d – диаметр частицы;
 k – постоянная Больцмана;
 t – время зарядки;
 N – средняя концентрация ионов;
 c – среднеквадратическая скорость иона
 T – температура в градусах Кельвина;
 ε – диэлектрическая проницаемость частицы;
 E – напряженность электростатического поля;
 e – заряд электрона.

По оценочным расчетам на частицу с $d = 60$ мкм и $\varepsilon = 4$ из-за диффузии за $t = 1$ с оседут около $4,8 \cdot 10^3$ ионов, а на частицу с $d = 30$ мкм – около $2 \cdot 10^3$ ионов. Такие заряды на частицах получены при $T = 273$ К, $N = 10^{17}$ м⁻³, $c = 4,5 \cdot 10^2$ м/с. Концентрацию N , входящую в формулу (1), при расчетах для избыточных отрицательных зарядов следует использовать с коэффициентом 0,5, а для положительных – с коэффициентом 0,2. Но на порядки величин эти коэффициенты существенно не повлияют. При зарядке частицы с $d = 60$ мкм в поле с $E = 100$ кВ/м, диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 4$ на частицу оседут $1,25 \cdot 10^5$ ионов, а на частицу с $d = 30$ мкм – $3,1 \cdot 10^4$ ионов. На отрицательно заряженных ГАЧ и СГАЧ растут ледяные кристаллы, и они превращаются в крупные зародыши града, так как только на отрицательно заряженной «подложке» возможен эпитаксиальный рост кристалла [15]. На положительно заряженной ГАЧ или СГАЧ образуются нитевидные кристаллики, которые обламываются, и их фрагменты, сталкиваясь с переохлажденными каплями, замораживают их, образуя капельные зародыши града. Некоторые крупные зародыши могут также контактировать с переохлажденными каплями, образуя капельные зародыши града. Таким образом, только зарядение ГАЧ или СГАЧ в ИОЗ может превратить их в зародыши града. Ясно, что только крупные частицы, на которых оседет большее количество ионов, превратятся в зародыши града.

Физической основой предлагаемого комбинированного («реагент плюс искусственно инициированная молния») метода предотвращения образования града является, во-первых, обрушение электроактивных зон, где происходит формирование частиц осадков и града, искусственно инициируемых молниями (ИИМ), токопроводящими объектами (в частности, при помощи противорадиолокационных ракет с токопроводящей поверхностью – ТПП). Впервые возможность инициирования искусственных молний плазменными образованиями, получающимися при подрыве в грозоградном облаке 100 мм артиллерийских снарядов, применявшихся ранее в противорадиолокационной защите как средство доставки ЧКР в облако, была обоснована и подтверждена в работе [16]. Было установлено, что под действием искусственных молний, через 2-3 мин площади радиолокационных отражаемостей облака значительно уменьшаются.

Возникающее локальное усиление напряженности поля у кромок ракеты с ТПП приведет к молниевым разрядам по траектории полета, если на пути движения она будет встречаться с электроактивными зонами. Усиление электрического поля по одному методу расчета для такой ракеты составит около 20 раз (проводящий стержень), по другому методу – до 140 раз и более (эллипсоид). Электроактивные зоны, являясь зоной левитации заряженных частиц и образуя таким способом дополнительные зоны аккумуляции, способствуют росту в них частиц осадков и града. Ликвидация зон аккумуляции под воздействием ИИМ прекратит процесс роста частиц осадков и града, и это явление адекватно явлению преждевременного

осадкообразования, но отличается тем, что при инициировании молний сама зона роста захватывается вместе с растущими градинами.

Во-вторых, самое важное явление, вызываемое искусственной молнией в грозоградом облаке, – это внедрение в облачное пространство избыточного объемного заряда, движущейся стримерной зоной лидера искусственной молнии. Концентрация ионов в ИОЗ составляет 10^{17} м^{-3} . Сечение стримерной зоны может иметь диаметр порядка 50–80 м и может простираться на 100–300 м [19] от головки лидера. Пронизываемое молниями от одной модифицированной ракеты пространство будет зависеть от количества и расположения электроактивных ячеек. Согласно существующему методу предотвращения образования града, необходимо внести в облако ЧКР с концентрацией $10^{12}–10^{13} \text{ м}^{-3}$, которая должна в последующем снизиться до $10^6–10^7 \text{ м}^{-3}$, с образованием на них кристалликов льда. В этом случае ГАЧ и СЧАГ будут уже рассеяны, и образующиеся под действием инициируемых молний зародыши града могут конкурировать с естественными зародышами льда за влагу в облаке прямо в зоне роста града. Роль ЧКР в предлагаемом методе будет сводиться к замораживанию переохлажденных капель на траектории полета по обычной схеме.

Запуски противогородовых ракет с ТПП для предлагаемого комбинированного метода воздействия производятся при углах запуска 60° , 65° и 70° в область грозоградом облака с максимальной отражаемостью около 45–50 dBZ. При больших углах запуска максимальная высота траектории ракеты превысит высоту 8 км, ограниченную «Федеральными правилами использования воздушного пространства РФ от 11. 03.2010 г. № 138».

Количество необходимых для воздействия ракет будет зависеть от геометрических параметров объекта воздействия. При этом следует принимать во внимание, что, если согласно [20] в естественных грозоградом облаках количество внутриоблачных молний превышает 71, то из них град не выпадает. Привлекательность такого факта переключается с отстаиваемым в предлагаемом методе в части того, что молнии, создавая при их большом количестве больше зародышей града, способствуют уменьшению их размера при их росте в среде с ограниченной водностью, что приводит к их таянию, т. е. к предотвращению выпадения града.

Так как реагент действует в переохлажденной части облака, то протяженность участка траекторий ракеты «Алазань-6» с отрицательными значениями температуры будет, естественно, зависеть от высоты изотермы 0°C . Для изотермы $H_0 = 3,5 \text{ км}$ при всех углах запуска ракет протяженность проекции траектории составит 6,6 км, для $H_0 = 4 \text{ км} – 6 \text{ км}$ и для $H_0 = 4,5 \text{ км} – 5,5 \text{ км}$.

Экспериментально установлены [11] области возникновения молний для суперячеек на высоте около 8 км, где $T = -30^{\circ}\text{C}$. Для мультячеек имеются две области: на высоте 6 км, где $T = -10^{\circ}\text{C}$ и на высоте 11 км, где $T = -40^{\circ}\text{C}$. Исходя из изложенных фактов, для реализации комбинированного метода предотвращения града из мультячейковых облаков ракетой с ТПП следует обстреливать облако в области со значениями отражаемости 40–45 dBZ.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫПАДЕНИЯ ГРАДА КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

Выпадение заряженных частиц осадков и града, обусловленное левитацией при снятии электростатического поля инициированной молнией, приведет к уменьшению радиолокационной отражаемости в местах наблюдения электроактивных зон (зон аккумуляции). Применимость противогородовых ракет с ТПП экспериментально подтверждена регистрацией инициируемых ими искусственных молний с помощью грозорегистратора LG 8000. Количество молний от ракеты может составлять от одной до нескольких штук. В предварительных экспериментах по проверке предлагаемого метода получены обнадеживающие результаты – ис-

кусственные молнии понижают высоту радиолокационной отражаемости грозоградового облака в течение нескольких минут [5, 16–18].

Для обоснования безопасной применимости ракет с ТПП для воздействий, по просьбе руководства «ФГБУ «Северо-Кавказская ВС», на заводе имени Чапаева (изготовителя противогордовых ракет) исследовалась дробимость модифицируемых алюминиевой фольгой ракет. В результате было установлено, что «осколки корпусов с наклеенной на их поверхности токопроводящего покрытия (алюминиевой фольгой) аналогичны по размерам и массе осколкам корпусов без токопроводящего покрытия» (акт-отчет № 33/6-2020 по программе 33/3 2020 по изделию «Алазань-6» от 14.02.2020). Для проведения эксперимента по подтверждению предлагаемого метода предотвращения града заводом было изготовлено 48 модифицируемых противогордовых ракет.

Эксперименты по воздействию на градовое облако противогордовыми ракетами «Алазань-6» с ТПП проводились 1 сентября 2021 года. В соответствии с принятым рабочим документом [РД по классификации объектов воздействия (ОВ)] в этот день в градовом процессе реализовались 8 ОВ третьей категории и 4 ОВ второй категории. Ракеты запускались с трех пунктов воздействия тройками, промежутки старта ракет в тройке составляли около 3 с, азимутальный угол между ракетами был равен 5° , а угол возвышения – 65° . Максимальная высота траектории полета ракет была около 7 км. Зависимость расстояний между траекториями ракет была представлена в виде следующей таблицы:

L , км	3	4	5	6	7	8	9	10
$2b$, км	0,35	0,7	0,87	1.04	1.22	1,4	1,57	1,83

Обозначения, принятые в таблице: L – горизонтальная проекция траектории ракеты при $L = 10$ км, на высоте 6,2 км, $2b$ – расстояния между проекциями траекторий, между крайними ракетами при их самоликвидации $2b = 1,83$ км.

С целью проверки предлагаемого метода предотвращения града в день воздействия был выбран ОВ третьей категории № 5, который зародился в 15:20 вблизи селения Кёнделен и начал смещаться со скоростью около 20 км/ч на защищаемую территорию (ЗТ) КБР. При тенденции развития облака к усилению и росту града в нем с 15:29 по 15:33 с пунктов воздействия (ПВ) вблизи селений Заюково и Верхний Куркужин тройками были запущены по шесть ракет с ТПП и шесть стандартных ракет с ПВ вблизи Кёнделена. Воздействие на облако № 5 было продолжено с указанных ПВ с 15:35 по 15:42 запусками по шесть ракет с ТПП. В результате воздействия из ОВ № 5 выпадали только ливневые осадки. В 15:47 это облако начало регенерировать, и в районе г. Баксан появились новые грозовые ячейки. В 16:02-16:04 с ПВ вблизи селения Кызбурун-2 была обработана передняя фронтальная область навеса радиоэха шестью ракетами с ТПП. Вблизи облака № 5 на высоте около 8 км в 16:05 локализовалась новая градоопасная ячейка № 6. На этот ОВ третьей категории было запущено шесть ракет с ТПП с ПВ Кызбурун-2. Всего на облако № 6 израсходованы 10 ракет с ТПП. Выпадение града из ОВ третьей категории № 5 и № 6 не зафиксировано. Это свидетельствует о том, что применение предлагаемого метода предотвращения града является обнадеживающим методом борьбы с градобитиями. Инициированные ракетами с ТПП искусственные молнии фиксировались грозорегистратором LG 8000К.

На рис. 1 точками показаны молниевые разряды. Различить возможные естественные молнии и искусственные на рисунке не представляется возможным. Однако дополнительный анализ времени запуска ракет и появления молний позволяет идентифицировать искусственные молнии. Кроме того, кучность точек на северо-западном направлении от ПВ, вблизи с. Заюково, и в северном направлении, вблизи с. Верхний Куркужин, свидетельствует об инициировании ракетами с ТПП искусственных молний. Отсутствие такой кучности точек вблизи ПВ (с. Кызбурун-2), с которого также были запущены 12 ракет с ТПП, объясняется,

возможно, близостью датчиков грозопеленгатора, что, в свою очередь, может повлиять на идентификацию молний.

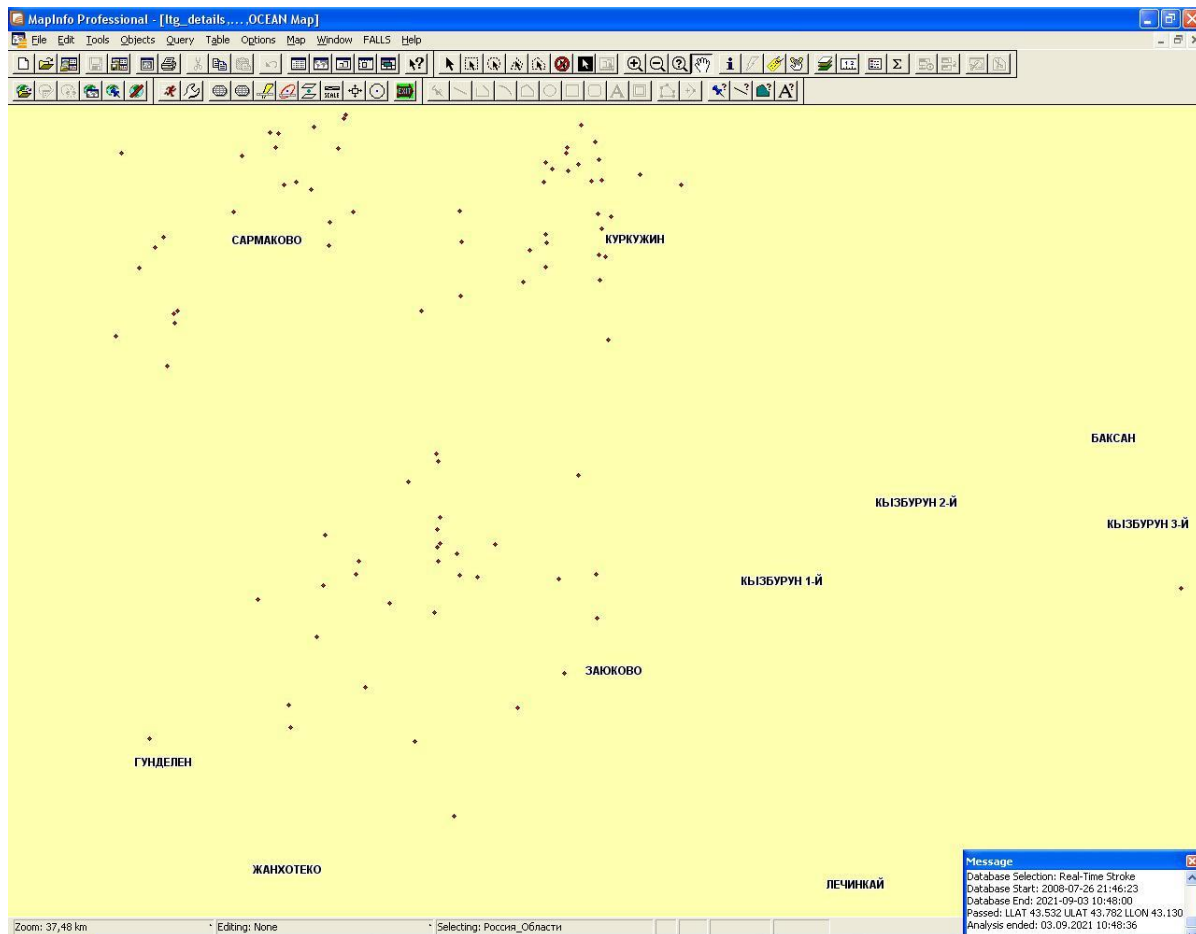


Рис. 1. Молниевые разряды, обозначенные точками

Ракеты с ТПП по траектории полета в случае наличия встречных объемных зарядов при значениях напряженности поля, достаточных для зарождения лидерных типов электрических разрядов, будут инициировать искусственные молнии. Возникающие при самоликвидации ракеты с ТПП продукты детонации – плазменное образование, осколки корпуса ракеты – могут, как источники локального усиления напряженности поля, явиться причиной зарождения искусственных молний. Следует также отметить, что имеются случаи инициирования искусственных молний при самоликвидации стандартных ракет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Физической основой предотвращения града с помощью предлагаемого комбинированного метода являются:

а) ликвидация зон аккумуляции между верхним +P и нижним -N зарядами, образующихся вследствие левитации отрицательно заряженных гидрометеоров, искусственно инициируемых молниями, в частности с помощью запускаемых в грозоградовое облако противоградовых ракет с ТПП;

б) создание в облачном пространстве конкурирующих с естественными зародышами града дополнительных зародышей на гигантских и сверхгигантских частицах реагента с разме-

рами от 2 до 60 мкм и более при их зарядке в ИОЗ с концентрацией ионов 10^{17} м^{-3} , который внедряется в облачное пространство стримерной зоной лидера искусственно инициированной молнии.

2. Ракетами с ТПП можно защитить от молний и града различные объекты на земле: стартовые комплексы ракет-носителей, атомные электростанции, крупные электрораспределительные подстанции, ценные лесонасаждения, ограниченные площади – сады; плантации табака, винограда; теплицы и т.д., поскольку, инициируя молнии, можно обрушить зоны аккумуляции – электроактивные зоны, в которых происходит рост осадков, в том числе и града.

3. Инициированием искусственных молний представляется возможным не только вызывать осадки, но и перераспределять их.

Список используемых источников

1. *Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Малкарова А. М.* Состояние и перспективы развития техники и технологии противорадовой защиты: доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8-9 октября 2014 г., Нальчик. – Нальчик: ООО «Печатный двор», 2015. – С. 13–23.
2. *Сулаквелиде Г. К.* Ливневые осадки и град. – Л.: Гидрометеиздат 1967. – 412 с.
3. *Хоргуани В. Г.* Микрофизика зарождения и роста града. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 187 с.
4. *Женев Р.* Град. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 106 с.
5. *Бейтуганов М. Н., Чочаев Х. Х.* Метод предотвращения и прерывания града комбинированным методом «реагент плюс искусственно инициированные молнии» // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8–10 сентября 2021 г. – Нальчик: Принт Центр, 2021. – С. 257–260.
6. *Piergramss M.Y., Krider E., Moore C.B.* Lightning and surface rainfall during Florida thunderstorms // J. Geophys. – 1982. – Vol. 87, № 13. – P. 11193–111201.
7. Radar study of precipitation development in thunderclouds / C.K. Holms [et al.] // Elec. Process Atmos. Proc. Cond, Garmisch-Partenkirchen-1974. – Darmschtadt, 1977. – P. 633–637; Florida thunderstorms // J. Geophys. 1982. – Vol. 87, № 13. – P. 1193–111201.
8. *Мучник В. М.* Физика грозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 351 с.
9. *Gunn R.* Electrical field intensity inside of natural clouds // J. Appl. Phys. – 1948. – Vol. 19, № 5. – P. 48
10. *Стасенко В. Н.* Радиолокационное исследование многоячеистых конвективных облаков. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. – 90 с.
11. *Ray P.S., MacCorman D.R., Rust W. Davud* Lightning relative to storm structure in a supercell storm and multicell storm. J.G.R. – 1987. – D 92, № 85. – P. 5713–5724.
12. *Имянитов И. М.* Строение и условия развития грозových облаков // Метеорология и гидрология. – 1981. – № 3. – С. 5–17.
13. *Бейтуганов М. Н.* Электрические разряды различных типов и молний как причина превращения частиц микропримеси атмосферы в зародыши града // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: сб. науч. тр. – Нальчик, 2017. – Ч. 2. – С. 249–256.
14. *Райст П.* Аэрозоли: введение в теорию. – М.: Мир, 1987. – 239 с.
15. *Дистллер Г. И., Кобзарева С. А.* Дальнодействие активных центров кристаллических поверхностей // Доклады АН СССР. – 1967. – № 172. – С. 1069–1071.
16. *Бейтуганов М. Н.* Предотвращение градобитий путем инициирования искусственных молний в грозоградовых облаках // Доклады Адыгской (Черкесской) международной академии наук. – 1998. – Т. 3, № 2. – С. 84–92.

17. *Бейтуганов М. Н.* Иницирование искусственных молний как метод предотвращения града // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 1(51). – С. 38–43.
18. *Бейтуганов М. Н., Чочаев Х. Х.* Опыты по предотвращению града иницированием искусственных молний с помощью противогорадовых ракет с токопроводящей поверхностью // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Нальчик, 23–27 сентября 2019 г.: сб. тр. – СПб., 2019. – С. 63–72.
19. *Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В. И.* Физические и инженерные основы молние-защиты. – М.: Гидрометеиздат, 1978. – 202 с.
20. *Liu C., Heckman S.* Total lightning data and real-time severe storm prediction // In TECO-2012: WMO Tech. Conf. on Meteorological and Environmental instruments and Methods of Observation. – 2012. – P. 1–12.

Н. Ф. Благовещенская*,

доктор физико-математических наук;

Т. Д. Борисова*,

кандидат физико-математических наук;

И. М. Егоров*,

А. С. Калишин*,

кандидат технических наук

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
Росгидромета, г. Санкт-Петербург.

ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ O- И X-ПОЛЯРИЗАЦИИ

Представлены результаты экспериментальных исследований явлений в F -области высокоширотной ионосферы при одновременном излучении мощных КВ радиоволн X - и O -поляризации. В период эксперимента эффективная мощность излучения X -волны составляла 130.5 МВт, а O -волны – порядка 30 МВт. Обнаружено, что в этих условиях происходит генерация явлений, типичных для X - и O -нагрева.

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, поляризация, высокоширотная ионосфера, искусственное радиоизлучение ионосферы, ионосферные неоднородности, плазменные волны.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения эффектов модификации верхней (F -область) ионосферы, как правило, используются мощные КВ радиоволны (волны накачки) обыкновенной (O -мода) поляризации, излучаемые специально построенными наземными нагревными комплексами. Это обусловлено тем обстоятельством, что согласно современным теоретическим исследованиям [1, 2] искусственная ионосферная турбулентность (ИИТ) в F -области ионосферы может возбуждаться только мощными КВ радиоволнами O -поляризации на частотах излучения f_H ниже критической частоты слоя $F2$ ($f_H \leq foF2$). Мощные КВ радиоволны необыкновенной (X -мода) поляризации отражаются от ионосферы на высотах ниже, чем радиоволны O -поляризации, поэтому они не достигают резонансных высот и не должны вызывать генерацию искусственной ионосферной турбулентности в F -области ионосферы [1, 2].

Однако результаты экспериментов по воздействию мощных КВ радиоволн на F -область высокоширотной ионосферы, выполненных в 2011–2021 гг. на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating в северной Норвегии, убедительно показали, что интенсивные ионосферные возмущения могут создаваться не только волнами накачки O -поляризации, но и мощными КВ радиоволнами X -поляризации [3–7]. Важно отметить, что в отличие от O -нагрева, когда возмущения в F -области ионосферы создаются только на частотах $f_H \leq foF2$, X -нагрев вызывает генерацию возмущений на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя $F2$ ($f_H < foF2$ и $f_H > foF2$) [6, 7].

Учитывая, что на частотах нагрева $f_H \leq foF2$ возможно возбуждение ИИТ при воздействии мощных КВ радиоволн как O -поляризации, так и X -поляризации, представляется важным исследовать эффекты в высокоширотной F -области ионосферы, вызванные одновременным воздействием волн накачки O - и X -поляризации.

Целью данной работы является анализ результатов экспериментальных наблюдений с помощью разнообразных диагностических средств, полученных в период специально ориентированного эксперимента на высокоширотном КВ нагревном стенде EISCAT/Heating при кон-

тролируемом одновременном излучении мощных КВ радиоволн обыкновенной (O -мода) и необыкновенной (X -мода) поляризации. Будут рассмотрены характеристики и поведение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), широкополосного и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (ШИРИ и УИРИ), параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации и температуры, N_e и T_e), ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности. Кроме того, будет выполнено их сравнение с эффектами при «чистом» нагреве на O -моду.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент выполнялся специалистами ААНИИ 28 октября 2015 г. на нагревном стенде EISCAT/Heating (69.6° N, 19.2° E, $L=6.2$, $I=78^\circ$) в г. Тромсе (Норвегия), детальное описание которого приведено в работе [8]. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 5.423 МГц. Эксперимент проводился при спокойных магнитных условиях в вечерние часы с 15:30 до 16 UT циклами: 10 мин – нагрев, 5 мин – пауза. Частота нагрева была чуть ниже критической частоты слоя F_2 ($f_H < foF_2$) и частоты четвертой гирогармоники электронов ($f_H < 4f_{ce}$). В таких условиях возможна генерация явлений, вызванных воздействием мощной КВ радиоволны как O -, так и X -поляризации. В цикле нагрева 15:31–15:41 UT излучалась мощная радиоволна O -моды поляризации. Эффективная мощность излучения в течение первых 6 мин цикла (15:31–15:37 UT) составляла 362.4 МВт, а затем в период 15:37–15:41 UT была уменьшена до 236.9 МВт. Просачивание X -волны было очень низким, около 0.6–0.7 МВт. Следовательно, в этом цикле осуществлялся практически «чистый» O -нагрев. В следующем нагревном цикле 15:46–15:56 UT производилось одновременное излучение:

- 130.5 МВт (80% от полной мощности излучения) на X -моду поляризации;
- 29.9 МВт (20% излученной мощности) на O -моду поляризации.

Для диагностики эффектов воздействия мощных КВ радиоволн использовались разнообразные средства и методы:

- 1) аппаратура для регистрации широкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (ШИРИ) в полосе 200 кГц вблизи нагревного стенда в Тромсе;
- 2) аппаратура для наблюдений узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в полосе ± 1 кГц (относительно частоты нагрева), установленная вблизи Санкт-Петербурга (60.27° N, 29.37° E) на расстоянии 1200 км от нагревного стенда [5];
- 3) радар некогерентного рассеяния радиоволн на частоте 930 МГц [9], пространственно совмещенный со стендом EISCAT/Heating;
- 4) КВ радар CUTLASS (63° N, 27° E) [10], установленный в Ханкасалми (Финляндия), к югу от нагревного стенда на ~ 1000 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

На рис. 1 представлены спектрограммы искусственного радиоизлучения ионосферы (широкополосного в полосе ± 100 кГц и узкополосного в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) 28 октября 2015 г. с 15:30 до 16 UT.

Как следует из анализа рис. 1,а, спектрограмма ШИРИ, зарегистрированная вблизи Тромсе, демонстрирует спектральную компоненту, сдвинутую вниз от частоты нагревного сигнала на $\Delta f_- = 11$ кГц. Эта спектральная компонента, соответствующая частоте отстройки относительно нагревного сигнала $\Delta f_- = \Delta f_{DM} \approx 2 \times 10^{-3} f_H$, является хорошо известной DM компонентой в спектре ШИРИ, типичной для O -нагрева [1]. Вместе с тем DM компонента наблюдалась как в цикле 15:31–15:41 UT («чистый» O -нагрев), так и в цикле 15:46–15:56 UT,

в котором проводилось одновременное излучение мощных КВ радиоволн X - и O -поляризации. Отметим, что по данным наших многочисленных экспериментов при X -нагреве, в которых просачивание O -моды волны было менее 5 МВт, ДМ компонента в спектре ШИРИ не регистрировалась [5, 6]. Является неожиданным факт низкой интенсивности ДМ компонента при «чистом» O -нагреве с «холодного старта» при высокой эффективной мощности излучения $P_{эфф} \approx 362$ МВт, но ее интенсивность возросла, когда $P_{эфф}$ была понижена до 237 МВт во второй половине цикла нагрева 15:31–15:41 UT. В следующем цикле нагрева, когда только 30 МВт излучалось в O -моду, регистрировалась интенсивная ДМ компонента в течение всего цикла нагрева. Такое поведение ДМ компоненты объясняется влиянием аномального ослабления и самовоздействия мощной КВ радиоволны O -поляризации, которые выражены в максимальной степени при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 250$ МВт).

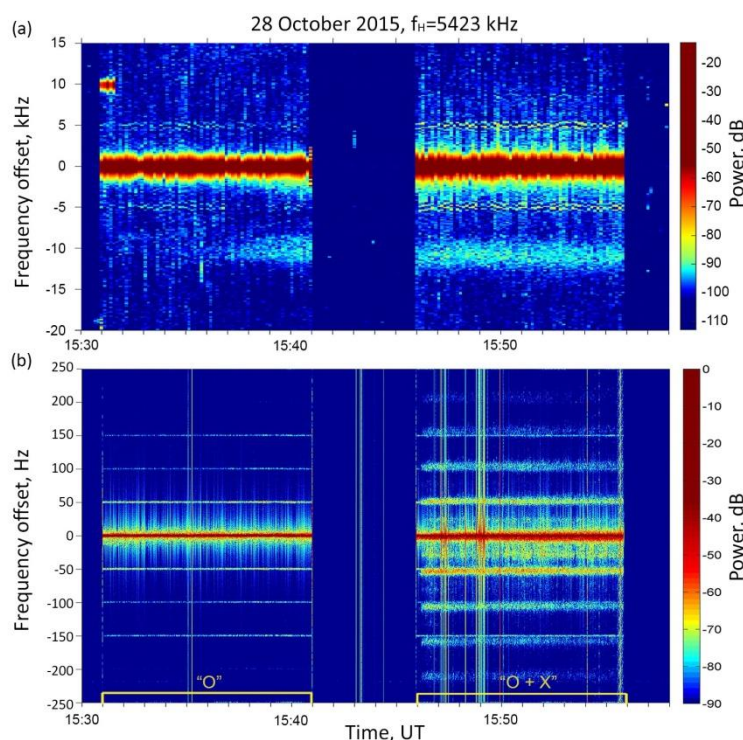


Рис. 1. Спектрограмма ШИРИ, зарегистрированная в Тромсе (а), и спектрограмма УИРИ, полученная под г. Санкт-Петербургом на расстоянии 1200 км от нагревного стенда (б), 28 октября 2015 г. с 15:30 до 16 UT. Частоте нагревного сигнала на спектрограммах соответствует нулевая частота отстройки. Циклы нагрева и используемая поляризация показаны на нижней панели (на оси времени)

Генерация ДМ компоненты тесно связана с возбуждением мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН). В период эксперимента в циклах нагрева по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS регистрировались интенсивные МИИН с характеристиками (времена нарастания и релаксации), типичными для O -нагрева.

Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (рис. 1, б), регистрируемое на большом удалении (~ 1200 км) от нагревного стенда, наблюдалось только в цикле 15:46–15:56 UT при одновременном излучении X -волны ($P_{эфф} \approx 130$ МВт) и O -волны ($P_{эфф} \approx 30$ МВт). Спектр УИРИ демонстрирует многократные смещенные по частоте вниз и вверх относительно частоты нагревного сигнала спектральные компоненты, разнесенные друг от друга на гирочастоту ионов f_{ci} (для ионов O^+). Подобные многократные ионно-гармони-

ческие структуры в спектре УИРИ регистрировались только при X -нагреве во многих наших экспериментах, выполненных на нагревном стенде в Тромсе [5]. При «чистом» O -нагреве с 15:31 до 15:41 UT УИРИ не наблюдалось. На спектрограмме видны только слабые сетевые гармоники, кратные 50 Гц.

Рассмотрим результаты наблюдений с помощью EISCAT радара некогерентного рассеяния (НР), пространственно совмещенного с нагревным стендом, в период эксперимента 28 октября 2015 г. с 15:30 до 16 UT. На рис. 2 представлено высотное-временное поведение электронной концентрации N_e и температуры T_e , а также мощности рассеянного сигнала радара, обозначенной как *Raw Electron Density*. Возрастания мощности рассеянного сигнала являются указанием на появление в спектре сигнала усиленных нагревом ионных линий, свидетельствующих о возбуждении ионно-акустической турбулентности.

Как следует из анализа рис. 2, O -нагрев при высоких $P_{эфф} \approx 362$ МВт в 15:31–15:37 UT вызывает сильные возрастания температуры электронов T_e (до 200% относительно фоновых значений). В 15:37 UT величина $P_{эфф}$ была понижена до ~ 236 МВт, приводя к уменьшению возмущений T_e . «Чистый» O -нагрев с $P_{эфф} \approx 362$ МВт вызывает также возбуждение интенсивной «классической» неустойчивости – параметрической распадной (parametric decay instability, PDI), возникающей как мгновенный отклик на включение нагревного стенда. После этого наблюдалось возобновление генерации усиленных нагревом ионных линий в течение цикла «чистого» O -нагрева. Анализ спектров EISCAT радара НР в этом цикле показал, что кроме усиленных нагревом ионных линий (HF-enhanced ion lines, HFILs) возбуждались инициированные нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPLs), которые регистрировались непрерывно и сопровождалась генерацией МИИН. Возбуждение МИИН при O -нагреве происходит вследствие развития тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [thermal parametric (resonance) instability, TPI], как показано в работе [1].

В цикле 15:46–15:56 UT при одновременном излучении ~ 30 МВт с O -поляризацией и ~ 130 МВт с X -поляризацией эффекты нагрева проявлялись в возрастаниях T_e , которые были вызваны как тепловым нагревом O -волной, так и омическим нагревом мощной радиоволной X -поляризации. Слабые возрастания электронной плотности происходили на высотах, выше возмущений T_e , что является характерной особенностью X -нагрева. Усиленные нагревом ионные и плазменные линии не возбуждались. Из этого следует, что 30 МВт обыкновенно поляризованной (O -мода) волны накачки не достаточно для возбуждения «классической» PDI, которая развивается как мгновенный отклик на включение нагревного стенда. В этих условиях тем более невозможно возбуждение непрерывных ионных и плазменных линий, для генерации которых необходимы существенно более высокие мощности. С другой стороны, X -волна с мощностью ~ 130 МВт также не способна возбудить непрерывные ионные и плазменные линии, для генерации которых требуются $P_{эфф} \geq 150\div 200$ МВт [4].

Генерация различных явлений при одновременном воздействии мощных КВ радиоволн O - и X -поляризации управляется как эффективной мощностью излучения, так и пороговой мощностью, необходимой для генерации того или иного явления. Теоретические пороговые значения мощностей возбуждения тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [thermal parametric (resonance) instability, TPI], параметрической распадной неустойчивости (parametric decay instability, PDI), осциллирующей двухпоточковой неустойчивости (oscillating two stream instability, OTSI), а также распадной неустойчивости за счет нерезонансного механизма (NRM), ответственной за возобновление генерации ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, могут быть получены из хорошо известных выражений [11, 12]. Для условий эксперимента они имеют следующие значения:

- $P_{TPI} = 8.5$ МВт;
- $P_{PDI} = 37.3$ МВт;
- $P_{OTSI} = 57.2$ МВт;
- $P_{NRM} = 357.6$ МВт.

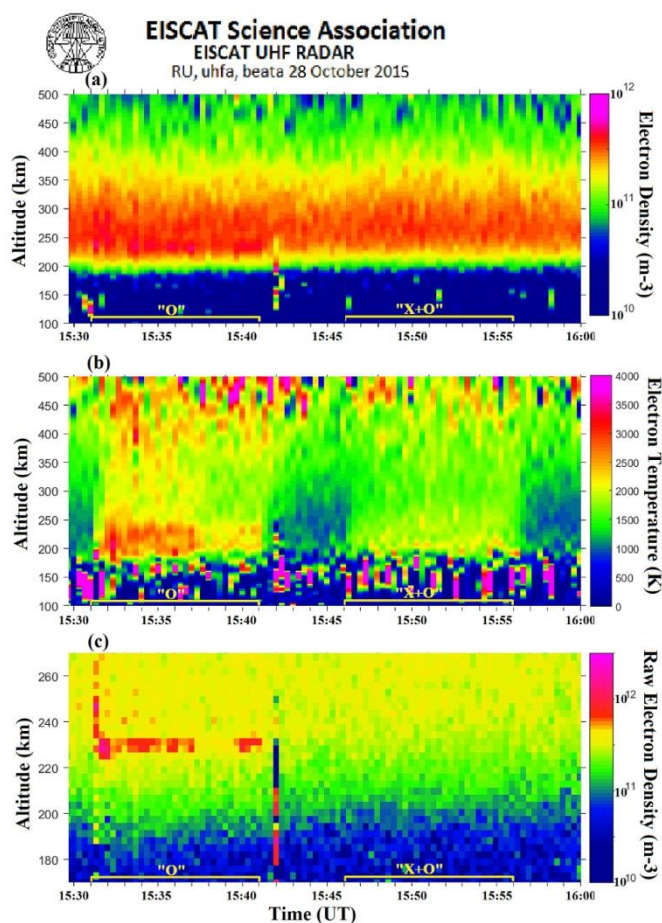


Рис. 2. Высотно-временное поведение электронной концентрации N_e (a), температуры T_e (b), а также мощности рассеянного сигнала радара, обозначенной как «the raw electron density» (c) по данным наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния EISCAT (930 МГц) в Тромсе 28 октября 2015 г. с 15:30 до 16 UT. Циклы нагрева и используемая поляризация показаны на оси времени

Теоретические оценки P_{TRI} , P_{PDI} , P_{OTSI} и P_{NRM} хорошо согласуются с результатами, полученными во время эксперимента 28 октября 2015 г., подтверждая, что при одновременном излучении мощных КВ радиоволн O - и X -поляризации с 15:46 до 15:56 UT O -волна накачки с $P_{\text{эфф}} = 30$ МВт вызвала генерацию МИИН за счет возбуждения ТР1, но не могла вызвать возбуждение непрерывных усиленных нагревом плазменных и ионных линий, сосуществующих с МИИН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в период специально ориентированного эксперимента на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating, важны для корректного анализа возможных эффектов просачивания O -моды мощной волны при X -нагреве высокоширотной F -области ионосферы. Относительно низкая эффективная мощность излучения X -волны ~ 130 МВт была выбрана для того, чтобы исключить возбуждение непрерывных усиленных нагревом ионных и плазменных линий в течение цикла X -нагрева, пороги возбуждения которых $P_{\text{эфф}} > 150 \div 200$ МВт [4]. Как правило, в период экспериментов на стенде EISCAT/Heating просачивание O -волны

при X -нагреве не превышает 5 МВт. Как следует из полученных результатов, 30 МВт с O -модой поляризации, смешанные со 130 МВт X -волны накачки, не способны возбудить непрерывные искусственные ленгмюровские и ионно-акустические плазменные волны, сосуществующие с МИИН. Следовательно, малые просачивания O -волны при X -нагреве высокоширотной F -области ионосферы КВ нагревным стендом EISCAT/Heating тем более не могут привести к генерации таких волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

Список используемых источников

1. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145–1177.
2. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // Physics Reports. – 1989. – Vol. 179. – P. 79–209.
3. Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping / N. F. Blagoveshchenskaya [et al.] // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2014. – Vol. 119. – P. 10483–10498.
4. Distinctive features of Langmuir and Ion-acoustic Turbulences induced by O- and X-mode HF Pumping at EISCAT / N. F. Blagoveshchenskaya [et al.] // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2020. – Vol. 125, № 7. – URL: <https://doi.org/10.1029/2020JA028203> (дата обращения: 23.11.2021).
5. Ion Gyro Harmonic Structures in Stimulated Emission Excited by X-Mode High Power HF Radio Waves at EISCAT / A. S. Kalishin [et al.] // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2021. – Vol. 126, № 8. – URL: <https://doi.org/10.1029/2020JA028989> (дата обращения: 23.11.2021).
6. Blagoveshchenskaya N. F. Perturbating the High-Latitude Upper Ionosphere (F Region) with Powerful HF Radio Waves: A 25-Year Collaboration with EISCAT // Radio Science Bulletin. – 2020. – № 373 (June 2020). – P. 40–55. – DOI:10.23919/URSIRSB.2020.9318436.
7. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave / N. F. Blagoveshchenskaya [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2011. – Vol. 38. – DOI: 10.1029/2011GL046724.
8. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility / M. T. Rietveld [et al.] // Radio Sci. – 2016. – Vol. 9. – P. 1533–1546.
9. Rishbeth H., T. van Eyken EISCAT: Early history and the first ten years of operation // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 1993. – Vol. 55. – P. 525–542.
10. Stereo CUTLASS: A new capability for the SuperDARN radars / M. Lester [et al.] // Ann. Geophys. – 2004. – Vol. 22. – P. 459–473.
11. The thresholds of ionospheric plasma instabilities pumped by high-frequency radio waves at EISCAT / C. Bryers [et al.] // J. Geophys. Res.:Space Phys. – 2013. – Vol. 118. – P. 7472–7481.
12. Kuo S.P. Overview of Ionospheric Modification by High Frequency (HF) Heaters-Theory // Progress In Electromagnetics Research B. – 2014. – Vol. 60. – P. 141–155.

А. А. Борисов,
кандидат технических наук, доцент;
Ю. В. Кулешов,
доктор технических наук, профессор;
А. Б. Маков,
доктор технических наук, доцент

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ДЕЙСТВИЙ ВОЙСК

Получены аналитические зависимости определения показателей эффективности и требуемой эффективности прогнозирования гидрометеорологических условий с использованием математического аппарата теории вероятностей и теории эффективности целенаправленных процессов. На основе представленных зависимостей разработан метод оценивания эффективности прогнозирования гидрометеорологических условий, который может быть использован оперативно-прогностическими подразделениями гидрометеорологической службы.

Ключевые слова: прогнозирование гидрометеорологических условий, показатель эффективности, гидрометеорологическая служба, группировка войск, гидрометеорологическая информация.

ВВЕДЕНИЕ

Очевидно, что природная среда в отдельных случаях оказывает негативное влияние на применение вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) группировки войск (ГрВ), в результате чего эффективность применения образцов военной техники может быть снижена, либо выполнение боевой задачи в сложившихся гидрометеорологических условиях (ГМУ) становится невозможным. Вследствие этого органами управления (ОУ) ГрВ при подготовке и проведении операций (боевых действий) производится учет ГМУ на основе гидрометеорологической информации (ГМИ), предоставляемой гидрометеорологической службой (ГМС) группировки. При этом наиболее востребованной является информация о будущем состоянии ГМУ в районе ведения военных действий. С ее помощью ОУ могут оценить влияние ГМУ на личный состав и ВВСТ ГрВ в будущих операциях (боевых действиях) и затем нивелировать это влияние, планируя проведение соответствующих мероприятий.

Таким образом, предоставление ОУ ГрВ качественной прогностической информации является важнейшей задачей, решаемой ГМС соответствующего уровня и принадлежности. Поэтому одной из задач, решаемых ОУ ГМС ГрВ, является оценивание качества прогностической деятельности подчиненных подразделений.

Однако подход к оцениванию качества прогнозов ГМУ, используемый в настоящее время гидрометеорологическими подразделениями ВС РФ, малоинформативен, так как не учитывает затраченные на получение прогнозов погоды материальные и временные ресурсы. Кроме того, используемый показатель качества должен отражать успешность решения обеспечиваемой системой – ГрВ боевой задачи, что в существующем подходе не предусматривается.

Для устранения вышеуказанных недостатков предлагается оценивать качество операции «прогнозирование ГМУ», т. е. ее эффективность, на основе разработанного авторами метода оценивания эффективности прогнозирования ГМУ при обеспечении действий войск (сил).

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Оценивание эффективности целенаправленных процессов, к которым относится и прогнозирование ГМУ, является задачей, решаемой с использованием математического и методического аппаратов теории эффективности целенаправленных процессов (ТЭЦП) [1].

В соответствии с методологией оценивания эффективности степень достижения цели любой операции, в том числе и прогнозирования ГМУ, зависит от количественного выражения таких ее атрибутивных свойств, как результативность ($\vartheta_{\langle n_1 \rangle}$), ресурсоемкость ($r_{\langle n_2 \rangle}$) и оперативность ($\tau_{\langle n_3 \rangle}$).

Факт достижения цели операции определяется с помощью одного из критериев оценивания: критерия пригодности (G) и критерия оптимальности (O). Определим их для случая оценивания эффективности прогнозирования ГМУ.

Анализ работы оперативно-прогностических подразделений показал, что в подавляющем числе случаев при прогнозировании ГМУ исследователю заранее известны значения показателей качества $r_{\langle n_2 \rangle}$ и $\tau_{\langle n_3 \rangle}$. В таком случае, согласно положениям ТЭЦП [1], известные показатели поглощаются остальными операндами и выражение для вычисления показателя эффективности прогнозирования ГМУ примет следующий вид:

$$P_{\text{пр}} = P(\hat{Y}_{\langle n_1 \rangle} \in \{\hat{Y}_{\langle n_1 \rangle}^{\partial}\} \cong U), \quad (1)$$

где $P_{\text{пр}}$ – показатель эффективности прогнозирования ГМУ;

$\hat{Y}_{\langle n_1 \rangle}$ – показатель качества прогнозирования ГМУ,
 $\hat{Y}_{\langle n_1 \rangle} = \langle \hat{\vartheta}_{\langle n_1 \rangle} \rangle$,

где $\hat{\vartheta}_{\langle n_1 \rangle}$ – показатель результативности прогнозирования ГМУ.

Очевидно, что определение аналитического вида показателя $\hat{\vartheta}_{\langle n_1 \rangle}$ и составляет задачу синтеза показателя $P_{\text{пр}}$.

Опыт разработки прогностической продукции показывает, что результативность операции прогнозирования ГМУ будет определяться:

- полнотой объема ГМИ (*data*), необходимой для разработки прогнозов различной заблаговременности;
- опытом инженера-синоптика (*exper*), разрабатывающего прогноз ГМУ;
- точностью (*sd*) объективного анализа, используемого при прогнозировании ГМУ – средним квадратическим отклонением;
- успешностью (*suc*) метода прогнозирования ГМУ, используемого в оперативной практике.

Тогда показатель результативности может быть представлен в следующем виде:

$$\hat{\vartheta}_{\langle 4 \rangle} = \langle data, exper, sd, suc \rangle. \quad (2)$$

Принимая во внимание выдвинутый выше тезис о наличии эффекта поглощения показателей затрат операционных ресурсов и времени, а также состав вектора $\hat{\vartheta}_{\langle 4 \rangle}$, найдем аналитическое выражение для показателя $P_{\text{пр}}$.

Анализ исследований в области эконометрии, политологии, социологии и других отраслей науки [2–4] показал, что для решения задачи оценивания вероятности появления некоторого

события с успехом используется подход, в соответствии с которым искомая вероятность аппроксимируется некоторой функцией распределения, т. е.

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}}(res = 1 | PR^T) = F_{\text{зр}}(PR^T A), \quad (3)$$

где $res = 1$ – положительный исход прогнозирования;
 PR – вектор предикторов, влияющих на исход прогнозирования;
 A – вектор неизвестных параметров, требующих оценивания;
 $F_{\text{зр}}(\cdot)$ – некоторая функция, аппроксимирующая закон распределения исхода прогнозирования ГМУ.

Использование конкретных законов распределения приводит к различным моделям бинарного выбора, а именно, если $F_N(\cdot) = \Phi(\cdot)$ – нормальный закон распределения с параметрами $(N(0,1))$, то получаемая модель является *probit*-моделью, тогда

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}}(res = 1 | PR^T) = \Phi(PR^T A), \quad (4)$$

если $F_A(\cdot) = \Lambda(\cdot)$ – логистический закон распределения, то получаемая модель является *logit*-моделью, тогда

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}}(res = 1 | PR^T) = \Lambda(PR^T A) = \frac{e^{PR^T A}}{1 + e^{PR^T A}}. \quad (5)$$

Найдем оценки $P_{\text{пр}}$ с использованием *logit*-регрессии. Тогда выражение для получения оценок $P_{\text{пр}}$ примет следующий вид:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}}(res = 1 | Y^T) = \Lambda(Y^T A) = \frac{e^{a_0 + a_1 data + a_2 exper + a_3 sd + a_4 suc}}{1 + e^{a_0 + a_1 data + a_2 exper + a_3 sd + a_4 suc}}, \quad (6)$$

где $\hat{Y} = \langle sd, suc, data, exper \rangle$ – вектор предикторов.

Коэффициенты логистической регрессии (6) оцениваются с помощью метода максимального правдоподобия на архивной выборке результатов оценивания качества разработанных прогнозов ГМУ, проводимого в оперативно-прогностических подразделениях в конце каждого календарного месяца.

СИНТЕЗ ПОКАЗАТЕЛЯ ТРЕБУЕМОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Для оценивания эффективности прогнозирования ГМУ необходимо предъявить требования к эффективности данной операции в виде задания требуемого ($P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}$) или оптимального ($P_{\text{пр}}^{\text{ОПТ}}$) значения вероятности достижения цели операции, а также необходимо сформулировать и реализовать один из критериев оценивания эффективности операции:

$$G: P_{\text{пр}} \geq P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}, \quad (7)$$

$$O: P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}}^{\text{ОПТ}}. \quad (8)$$

Очевидно, что значения показателя $P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}$ задаются ОУ ГрВ. Их общее содержание можно определить следующими тезисами:

- для успешного выполнения боевой задачи боевые возможности ГрВ должны превосходить боевые возможности группировки войск противника [5];
- влияние ГМУ на применение образцов ВВСТ в ряде случаев ухудшают боевые возможности ГрВ РФ;
- учет прогнозов гидрометеорологических величин и явлений, разрабатываемых ГМС ГрВ, в оперативных расчетах позволяет снизить влияние неблагоприятных ГМУ на применение образцов ВВСТ при подготовке операций (боевых действий) и повысить боевые возможности ГрВ.

Учитывая подобные соображения, ОУ ГрВ могут быть найдены оценки показателя $P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}$, обеспечивающие решение боевой задачи в складывающихся гидрометеорологических условиях. Для этого необходимо:

- определить показатель, характеризующий боевые возможности ГрВ;
- смоделировать на примере выбранного показателя влияние неблагоприятных ГМУ на боевые возможности ГрВ и учет возможностей ГМС по прогнозированию гидрометеорологических величин и явлений;
- зная показатели боевых возможностей ГрВ РФ и ГрВ противника, вывести значение показателя $P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}$ из соотношения, описывающего влияние на ВВСТ ГрВ РФ неблагоприятных ГМУ и возможностей ГМС по прогнозированию ГМУ.

Из работ [5–8] известно, что боевые возможности включают в себя боевой потенциал, боевую мощь и боевую способность воинских формирований.

Влияние неблагоприятных ГМУ и возможностей ГМС на боевые возможности ГрВ рассмотрены в работе [9]. Авторами настоящей работы получено следующее соотношение, описывающее боевые возможности ГрВ:

$$\text{БМ}_{\text{ГрВ}}^{\text{ГМС}} = (1 - p_{\text{НГМУ}} + p_{\text{НГМУ}} * P_{\text{пр}}) * \text{БП}_{\text{ГрВ}}, \quad (9)$$

- где $\text{БМ}_{\text{ГрВ}}^{\text{ГМС}}$ – боевая мощь ГрВ с учетом неблагоприятных ГМУ и возможностей ГМС по их прогнозированию;
- $p_{\text{НГМУ}}$ – климатическая повторяемость неблагоприятных ГМУ в районе проведения операции (боевых действий);
- $P_{\text{пр}}$ – показатель эффективности прогнозирования неблагоприятных ГМУ;
- $\text{БП}_{\text{ГрВ}}$ – боевой потенциал ГрВ, вычисленный по методике, изложенной в работе [7].

Принимая во внимание тот факт, что для успешного выполнения боевой задачи боевые возможности ГрВ РФ должны превышать боевые возможности ГрВ противника, показатель $P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}$ может быть найден из следующего соотношения:

$$\text{БП}_{\text{ГрВ}}^{\text{ПР}} < (1 - p_{\text{НГМУ}} + p_{\text{НГМУ}} * P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}) * \text{БП}_{\text{ГрВ}}, \quad (10)$$

где $\text{БП}_{\text{ГрВ}}^{\text{ПР}}$ – боевой потенциал ГрВ противника.

Тогда

$$P_{\text{пр}}^{\text{ТР}} = 1 - \frac{\text{БП}_{\text{ГрВ}}^{\text{ПР}}}{p_{\text{НГМУ}} * \text{БП}_{\text{ГрВ}}}. \quad (11)$$

Полученное значение показателя $P_{\text{пр}}^{\text{ТР}}$ далее можно использовать в соотношении (7) для реализации критерия пригодности G .

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

На основе полученных результатов и в соответствии с представленной в настоящей статье методологией предлагается метод оценивания эффективности прогнозирования ГМУ, блок-схема которого изображена на рис. 1.

Структурно метод состоит из трех компонент, включающих следующие действия:

- определение показателя эффективности прогнозирования ГМУ;
- определение показателя требуемой эффективности прогнозирования ГМУ;
- оценивание эффективности прогнозирования ГМУ.

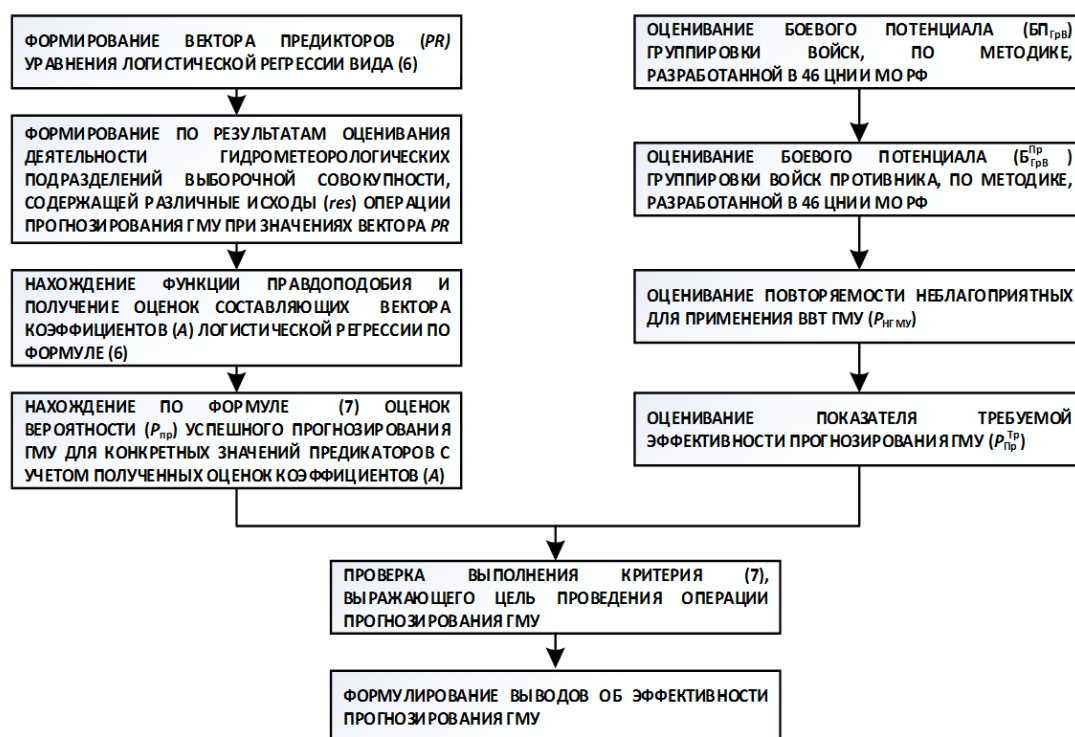


Рис. 1. Блок-схема метода оценивания эффективности прогнозирования ГМУ

Принципы формирования вектора предикторов (PR) сформулированы в работах, посвященных синоптической метеорологии и методам прогнозирования метеорологических величин и явлений погоды, например в [10, 11].

Для формирования выборочных совокупностей, содержащих исходы прогнозирования ГМУ, необходимо использовать результаты оценивания оправдываемости отдельных прогнозов погоды, разрабатываемых в гидрометеорологических подразделениях. Работа по оцениванию прогнозов погоды и определению их оправдываемости ведется на регулярной основе во всех гидрометеорологических подразделениях ВС РФ.

Значения $БП_{ГрВ}$ и $БП_{ГрВ}^{Пр}$ рассчитываются по методике, изложенной в работе [7]. В качестве входных данных в ней используются тактико-технические характеристики ВВСТ, находящейся на вооружении воинских формирований ГрВ.

Оценки повторяемости неблагоприятных для применения ВВСТ ГМУ определяются путем обработки архивных данных метеорологических наблюдений или берутся из климатического описания соответствующего физико-географического района.

Разработанный метод позволяет оценить успешность прогнозирования ГМУ при обеспечении действий войск (сил) в операциях (боевых действиях).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивание эффективности прогнозирования ГМУ является важнейшей задачей, решаемой ОУ ГрВ в рамках нахождения оценок эффективности ГМО в целом, поскольку от успешности прогнозирования ГМУ во многом зависит успешность планирования операций (боевых действий) ГрВ.

Используемые в предложенном методе входные данные являются доступными для применения в гидрометеорологических подразделениях ВС РФ, и поэтому представленный метод оценивания эффективности прогнозирования ГМУ может быть использован ГМС ГрВ различных масштабов и различной принадлежности к видам и родам ВС РФ.

С помощью разработанного метода также возможно оценить степень влияния ГМУ на боевые возможности ГрВ, а также выявить вклад ГМС в их повышение.

Список используемых источников

1. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 506 с.
2. Мурадов Д. А. Logit-регрессионные модели прогнозирования банкротства предприятий // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. – 2011. – № 3. – С. 24–31.
3. Хайдаршина Г. А. Эффективность современных методов оценки риска банкротства предприятий в российской практике финансового менеджмента: logit- и SVM-модели // Экономические науки. – 2008. – № 44. – С. 52–63.
4. Паклин Н. Б. Логистическая регрессия и ROC-анализ – математический аппарат // Официальный сайт компании BaseGroup Labs. – URL: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/logistic/> (дата обращения: 12.05.2021).
5. Цыгичко В. Н., Стоили Ф. Метод боевых потенциалов: история и настоящее // Военная мысль. – 1997. – № 4. – С. 23–28.
6. Брезгин В. С., Буравлев А. И. О методологии оценки боевых потенциалов вооружения и военной техники и воинских формирований // Военная мысль. – 2010. – № 8. – С. 41–48.
7. Брезгин В. С., Цырендоржиев С. Р., Буравлев А. И. Основы методологического подхода к оценке боевых потенциалов образцов ВВТ и воинских формирований // Вооружение и экономика. – 2009. – № 3. – С. 4–12.
8. Останков В. И., Казарин П. С. Методика сравнительной оценки боевых потенциалов войсковых формирований и качественного соотношения сил сторон в операциях // Военная мысль. – 2012. – № 11. – С. 47–58.
9. Методологический подход к оцениванию боевых возможностей межвидовых группировок войск (сил) с учетом гидрометеорологической обстановки и возможностей системы гидрометеорологического обеспечения / А. А. Борисов [и др.] // Навигация и гидрография. – 2017. – № 50. – С. 76–82.
10. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. – Изд. второе, перераб. и доп. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 711 с.
11. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 616 с.

В. В. Булкин*,

доктор технических наук, доцент;

С. А. Михеева*,

*Муромский институт (филиала) ФГБОУВО
«Владимирский государственный университет
имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ОТРАБОТАННЫМИ ГАЗАМИ АВТОТРАНСПОРТА НА УЧАСТКЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ УЛИЦ ГОРОДА МУРОМА

Загрязнение воздушной среды выхлопными газами автомобилей удобно оценивать по концентрации оксида углерода (угарного газа, СО), в мг/м³. Наибольшее количество выхлопных газов выделяется при работе на холостом ходу, разгоне и торможении. Именно поэтому на тех магистральных улицах, для которых характерно большое количество автомашин, медленное их движение и концентрация практически на каждом перекрестке, и выявляется наибольшее количество выбросов. Представлена оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами автотранспорта на участке магистральных улиц города Муром. Проведены оценочные расчеты и практическое измерение концентрации СО на основных автомагистралях города. Сделан вывод о потенциальных угрозах превышения предельно допустимых значений от 2,4 до 8,4 раз. Однако реальные значения концентрации СО показывают, что в целом ситуация в Муроме с точки зрения соблюдения норм содержания оксида углерода не вызывает опасений и находится в пределах допустимого. Кратковременные (до 2-3 ПДК) превышения имеют место только в некоторых районах города.

Ключевые слова: оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха, отработанные газы автотранспорта, участки магистральных улиц, концентрация СО, оксид углерода.

ВВЕДЕНИЕ

Конференция ООН по окружающей среде и развитию «Саммит Земли», состоявшаяся в 1992 г., выразила четко сформулированное мнение о необходимости иметь программы по определению экологических факторов, угрожающих здоровью, по уменьшению соответствующих рисков [1].

Общеизвестно, что активная технологическая деятельность приводит к взаимному влиянию человека на окружающую среду и обратному влиянию среды на человека. И влияние это становится всё более заметным [2]. Сам факт активной техногенной деятельности неизбежно вызывает загрязнение среды обитания, которое с развитием техносферы становится всё значительнее и ощутимее.

Цель публикации данной статьи заключается в оценке степени загрязненности одной из сред, а именно атмосферы. Такая загрязненность возникает как результат функционирования автомобильного транспорта, который является одним из основных источников загрязнения в городской среде.

Атмосфера – это наиболее подвижная из трех основных сфер обитания. Быстрые перемещения воздушных масс в латеральном и вертикальном направлениях, высокие скорости этих перемещений, разнообразие физико-химических реакций – всё это характеризует атмосферу с чрезвычайно высокой динамичностью. Обычным является перенос локальных загрязнений на значительные расстояния, что приводит к загрязнению атмосферы на удалении от источника загрязнений. Если рассматривать очень большие города или агломерации, то обычным является локализация температурных зон, зон вариаций атмосферного давления и т. п. Движение воздушных масс в таких пространственно-распределенных техногенных образованиях тоже имеет локальный характер, в силу чего образующиеся загрязнения могут как достаточно быстро переноситься в другие городские зоны, теряя при этом изначальную концентра-

цию до безопасного уровня, так и образовывать устойчивую локальную зону с накоплением концентрации и проникновением в почву, водоемы и технические конструкции [3].

Общеизвестно, что 98% в общем объеме выбросов вредных веществ (поллютантов), происхождение которых связано с техногенной деятельностью человека, приходится на диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_2), оксид углерода (СО) и твердые частицы. Именно эти загрязнители доминируют в статистике основных загрязнителей во многих городах России. Однако существенна доля и других загрязнителей, причем нередко случаи превышения уровней ПДК (предельно допустимая концентрация). К примеру, в 2008 г. практически во всех районах Санкт-Петербурга [4] превышение уровней ПДК некоторыми газообразными поллютантами составляло: до 1,6 ПДК – для диоксида азота; 1,4–3,5 ПДК – для бенз(а)пирена; до 2,5 ПДК – для озона; 1,3–3 ПДК – для формальдегида; 3,5–7,9 ПДК – для аммиака.

По результатам анализа 2011–2012 гг. в г. Иванове также имело место превышение допустимых уровней: по бенз(а)пирену – 1,4 ПДК, по формальдегиду – 4,6 ПДК, по взвешенным веществам – 1,4 ПДК [5]. Рост содержания диоксида азота был отмечен и на жилых территориях Москвы [6].

Поскольку указанные выше крупнейшие города относятся к тем, в которых (в силу их «столичности») защите окружающей среды уделяется существенное внимание, разумно предположить, что в больших, средних и малых промышленных городах положение может быть еще сложнее.

В ежегодном докладе «О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2021 году» отмечается, что выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников составляют 42,02 тыс. тонн (в 2020 г. – 41,55 тыс. тонн). Наибольший процент проб от общего количества исследований атмосферного воздуха в городских поселениях области приходился на диоксид азота (21,7%), взвешенные вещества (6,4%), диоксид серы (5,7%), оксид углерода (19,8%), аммиак (9,6%), углеводороды (6,4%), формальдегид (5%). Город Муром в данном списке занимает четвертое место (10,1%) [7]. При этом вклад передвижных источников загрязнения воздуха (автотранспорт) может составлять 40–75% [8] (по области доходит до 70% [9]).

Необходимо отметить, что Муром по количеству автомобилей на душу населения входит в число наиболее загруженных городов. За последние годы число зарегистрированных автотранспортных средств превысило 50000 при численности населения в городе порядка 110000 человек. Очевидно, что такое увеличение числа автомобилей неизбежно приводит к возрастанию насыщенности атмосферы воздуха разнообразными поллютантами, особенно с учетом «возраста» автомобиля.

В связи с вышесказанным для Мурома всё более актуальной становится задача анализа уровней загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами автотранспорта, особенно для основных районов города.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Загрязнение воздушной среды выхлопными газами автомобилей достаточно удобно оценивать по концентрации в воздухе (в городской среде) оксида углерода (угарного газа, СО; в мг/м^3), попадающего в атмосферу с выхлопными газами. Данный газ является одним из приоритетных загрязнителей воздушной среды, а также пагубно действует на нервную, дыхательную, сердечно-сосудистую и эндокринную системы организма.

Общеизвестно, что наибольшее количество выхлопных газов выделяется при работе на холостом ходу, разгоне и торможении. Именно поэтому при разработке программы анализа содержания газа в первую очередь следует учитывать те магистральные улицы, где наблюдается интенсивное движение с большим количеством машин в единицу времени, зоны с наличием «пробок» и, как следствие, с регулярным медленным движением транспорта и большим

количеством светофоров. Обычно именно в таких зонах и выявляется наибольшее количество выбросов.

К сожалению, исторически сложившаяся планировка улиц современного Муром привела к сосредоточению транспортных потоков в нескольких основных направлениях или узлах. Связано это с тем, что зона расположения города изначально изобиловала оврагами, для преодоления которых необходима засыпка оврагов или строительство мостов. И то и другое достаточно затратны. Поэтому число транспортных потоков ограничено и представлено несколькими основными направлениями или узлами, проходящими в направлениях «Южный микрорайон (промышленно-жилая зона) – Центр города», по линиям «юг-север» и «восток-запад». Совершенно очевидно, что такая планировка не способствует созданию благоприятной экологической обстановки в этих узлах. В связи с этим основными зонами для контроля следует считать районы следующих улиц: Ленина и Куликова (две основные линии автопотока «Южный – Центр»), Московская (главная улица города), Советская (улица-спутник главной улицы, частично с односторонним движением и регулярными заторами), Владимирская (выход на Владимирское шоссе), Войкова (выход на Нижегородскую трассу), Юбилейная (связь между Владимирским и Нижегородским направлениями).

Анализ содержания СО на улицах Муром проводился двумя способами: оценкой потенциального уровня содержания угарного газа в основных зонах движения автотранспорта города и практическими измерениями содержания СО на основных трассах автодвижения.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Анализ интенсивности движения автотранспорта был проведен по следующим категориям: легкий грузовой, средний грузовой, тяжелый грузовой (дизельный), автобусы, легковой. Для анализа были выбраны участки улиц: ТЦ «Цветочный», ул. Ленина; ТЦ «Витязь», ул. Советская; ТЦ «Тибор», ул. Куликова; Автовокзал, ул. Московская. Затем по методике [10] по полученным данным был проведен оценочный расчет уровня загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами автотранспорта по концентрации оксида углерода.

Указанные зоны выделены на карте части территории города (рис. 1) окружностями синего цвета.

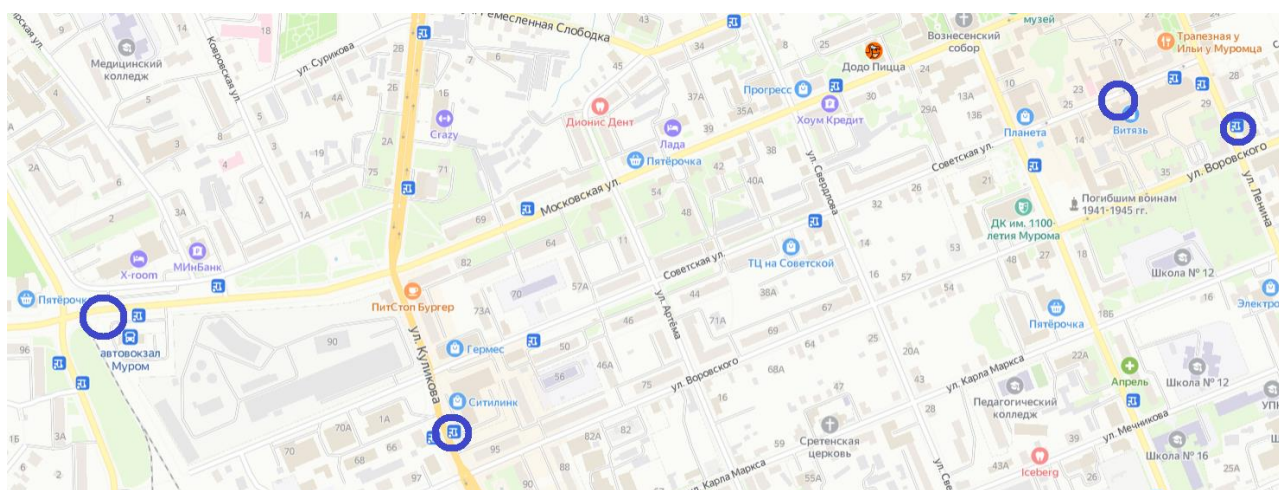


Рис. 1. Точки оценки потенциального содержания СО в воздухе в зоне основных транспортных магистралей города

Для всех точек учета на момент измерения основные требования по анализу соответствовали заложенным в методику [11]:

- 1) соответствующий условиям тип улицы – магистральная, с двусторонней застройкой;
- 2) уклон – ровный;
- 3) скорость ветра – до 4,5 м/с;
- 4) влажность атмосферного воздуха – в пределах 70%;
- 5) тип регулируемого пересечения – обычное, регулируется светофорами.

Расчет проводился по известному соотношению, используемому в таких методиках для оценки концентрации оксида углерода (K_{CO}):

$$K_{CO} = (0,5 + 0,01N \cdot K_T) \cdot K_a \cdot K_y \cdot K_c \cdot K_b \cdot K_n, \quad (1)$$

- где 0,5 – фоновое загрязнение атмосферного воздуха нетранспортного происхождения, mg/m^3 ;
- N – суммарная интенсивность движения автомобилей на городской дороге, автом./час.;
- K_T – коэффициент токсичности автомобилей по выбросам в атмосферный воздух окиси углерода;
- K_a – коэффициент, учитывающий аэрацию местности (для наших условий $K_a=1$);
- K_y – коэффициент, учитывающий изменение загрязнения атмосферного воздуха окисью углерода в зависимости от величины продольного уклона, $K_y=1$;
- K_c – коэффициент, учитывающий изменения концентрации углерода в зависимости от скорости ветра (для наших условий $K_c=1,20$);
- K_b – коэффициент, учитывающий изменения концентрации углерода в зависимости от относительной влажности воздуха (для наших условий $K_b=1$);
- K_n – коэффициент увеличения загрязнения атмосферного воздуха окисью углерода у пересечений, $K_n=1,8$.

Для случая потока автомобилей средневзвешенный коэффициент токсичности определяется по формуле

$$K_T = P_i \cdot K_{Ti}, \quad (2)$$

где P_i – состав движения в долях единиц. Значение K_{Ti} приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика коэффициента токсичности автомобилей [7]

Тип автомобиля	Коэффициент K_{Ti}
Легкий грузовой	2,3
Средний грузовой	2,9
Тяжелый грузовой (дизельный)	0,2
Автобусы	3,7
Легковой	1,0

В результате расчета потенциальной концентрации оксида углерода с учетом интенсивности движения автотранспорта по магистральным улицам г. Муром и на выбранных участках получены значения, приведенные в итоговой табл. 2.

ПДК_{мр} СО в атмосферном воздухе – 5 mg/m^3 [12].

Таким образом, результаты расчета говорят о том, что значения концентрации оксида углерода на всех измеряемых участках колеблются от 11,98 до 41,9 mg/m^3 и потенциально превышают предельно допустимую концентрацию (5 mg/m^3).

Таблица 2

Оценка концентрации оксида углерода на магистральных улицах г. Муром

Улица	Интенсивность движения, автом./час					N (сум.)	K _T (сум.)	K _{CO} (сум.)
	Легкий грузовой	Средний грузовой	Тяжелый грузовой (дизельный)	Автобус	Легковой			
Ленина	60	30	24	42	786	942	2,01	41,9
Советская	24	18	6	30	288	366	1,38	11,98
Куликова	102	60	42	12	1038	1254	1,2	33,58
Московская	84	36	6	18	1170	1314	1,17	34,3

ПРАКТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Для практического анализа были выбраны следующие участки, соответствующие представленным на рис. 2 (выделены красным цветом): № 1 – перекресток ул. Ленина – ул. Московская; № 2 – перекресток ул. Советская – ул. Куликова; № 3 – перекресток ул. Московская – ул. Куликова; № 4 – перекресток ул. Войкова – ул. Юбилейная; № 5 – перекресток ул. Владимирская – ул. Московская.

Для практического осуществления контроля содержания СО на выбранных участках были выбраны периоды времени, которые, во-первых, наиболее характерны с точки зрения интенсивности движения автотранспорта, а во-вторых, считаются общепринятыми. Измерения проводились в период активного движения жителей города и округа по пути на работу (утренний период, 7:30–8:30); в период активного движения производственного и общественного транспорта (дневной период 13:00–14:00); в период активного движения, связанного с завершением рабочего дня (вечерний период 16:30–17:30); в период, когда движение практически отсутствует (ночной период 22:00–23:00). Результаты измерений за один из дней контроля представлены в табл. 3. Контроль осуществлялся с использованием портативного газоанализатора МАГ-6П [13].

При этом выбранные участки имеют как «горизонтальную», так и «вертикальную» связь. Точки 1-3-5 расположены на линии центральной улицы города (связь по линии «восток-запад») с выходом на Владимирскую трассу, а точки 2-3-4 – на линии связи «микрорайон Южный – Нижегородская область» (связь по линии «юг-север»).

Таблица 3

Результаты контроля содержания СО в выбранных точках

Время суток	Концентрация СО по участкам, мг/м ³				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
7:30–8:30	-	-	-	-	-
13:00–14:00	12	1	-	-	-
16:30–17:30	-	-	2	11	3
22:00–23:00	-	-	-	-	15

Отсутствие в некоторых случаях зафиксированных результатов (табл. 3) – пробелы – обусловлено тем, что концентрация СО явно была незначительной и прибором фиксировались значения на уровне величины «0».

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы. На всех выбранных участках в утренние часы концентрация СО явно ниже (не превышает) ПДК (показания при-

бора на уровне погрешности). Иную картины имеем в середине дня. Так, на участке № 1 уровень концентрации достигает 12 мг/м^3 , что практически в 2,5 раза превышает ПДУ (5 мг/м^3) для территорий населенных пунктов. Объяснение такому существенному повышению концентрации следует искать в том, что на данном участке находятся: 1) одна из главных транспортных развязок города на линии автопотока в направлениях «Южный – Центр»; 2) «деловая» часть города, где расположена существенная часть административных учреждений; 3) существенная часть магазинов и торговых центров. Снижение уровня к концу рабочего дня может быть связано тем, что, во-первых, к этому моменту времени активность движения производственного автотранспорта уже снижается, а во-вторых, информация о «сложностях» в развязке данного места хорошо известна владельцам индивидуального транспорта, и на пути от работы домой они стараются выбрать другой маршрут при приближении к центру.

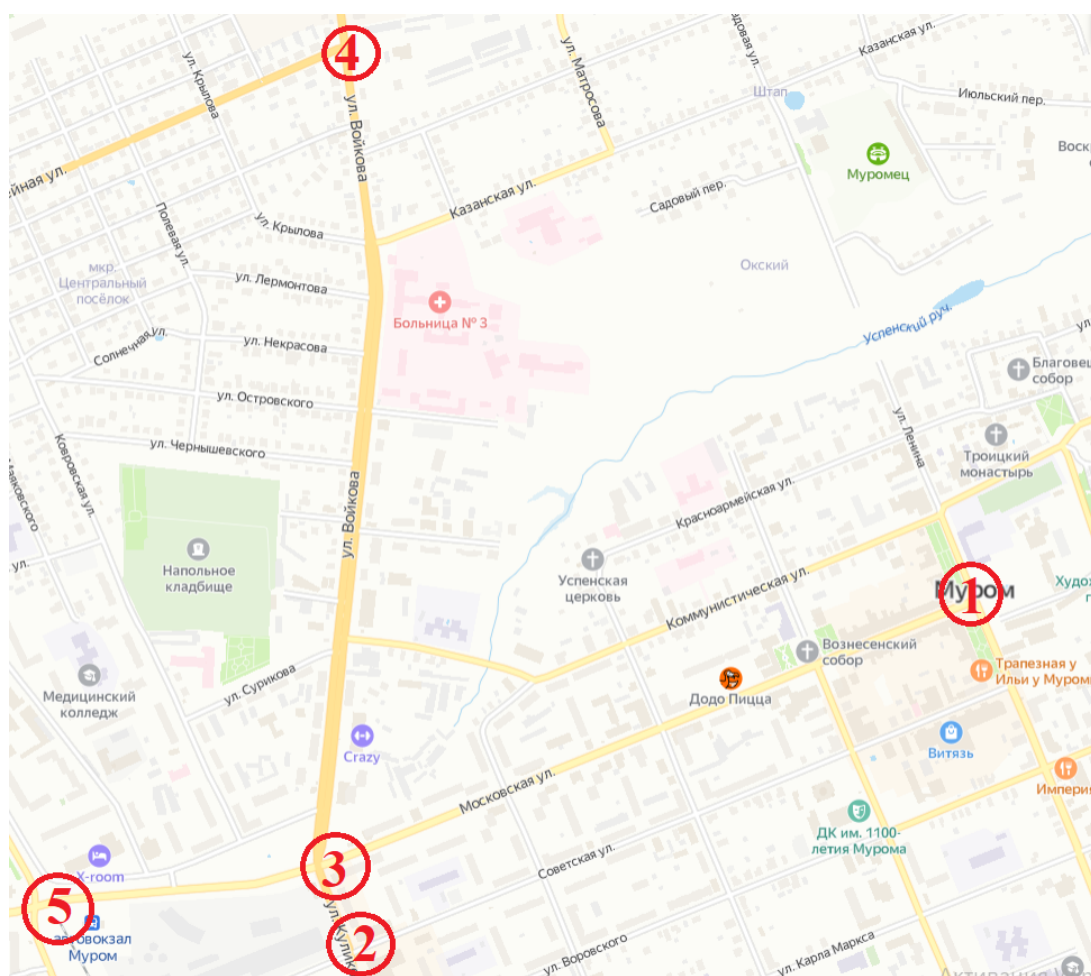


Рис. 2. Точки измерения содержания CO

Существенное повышение концентрации CO в районе участка № 4 в период времени 16:30–17:30 объясняется иными причинами. Необходимо учесть, что в данной зоне проходит автодорога, связывающая движение в направлении на Владимир и на трассу Москва – Казань. Именно этим переходом пользуются те, кто меняет направление движения с одного на другое. Кроме того, часть работников городских предприятий живет в пригородных районах и в этот период направляется домой. Следует учесть еще и то, что имеет место обратная картина: часть жителей города работает за пределами городской черты, в округе, и в этот период

возвращается домой. К тому же проезжая часть в данном районе является одной из самых узких в городе. Очевидно, что сочетание этих факторов и приводит к повышению уровня СО в конце рабочего дня в указанной зоне.

Сложно объяснить превышение ПДК практически в 3 раза в ночное время на участке № 5. В дневное время данную зону следует рассматривать как одну из наиболее напряженных «развязок» на главной улице города в центрально-западной части. Среди потенциальных источников загрязнения, расположенных в этой зоне, следует отметить расположенные рядом вагонное депо с железнодорожными путями, крупное предприятие по производству картона, автовокзал. Тут же расположена крупная гостиница с автостоянкой, база Газпрома. Кроме того, в этой точке берет начало Владимирское шоссе. В дневное время здесь осуществляется очень интенсивное движение автотранспорта. Однако даже в вечернее время концентрация СО «не дотягивает» до уровня ПДК. Здесь же расположена лесопарковая зона (бывший сосновый питомник). Таким образом, повышение концентрации в данном районе и в данное время простого логического объяснения не имеет, и необходимы дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показывает, что на всех рассматриваемых участках потенциальная концентрация оксида углерода при имеющейся активности движения автотранспорта на улицах города превышает предельно допустимые значения (5 мг/м^3) от 2,4 до 8,4 раз. Соответственно, у других опасных компонентов, составляющих выхлопные газы автотранспорта, концентрация также должна превышать ПДК, что приводит к еще большему загрязнению атмосферы.

В то же время полученные в процессе исследования реальные значения концентрации СО показывают, что в целом ситуация в Муроме с точки зрения соблюдения норм содержания оксида углерода не вызывает опасений и находится в пределах допустимого. Кратковременные (до 2-3 ПДК) превышения имеют место только в некоторых районах города.

Список используемых источников

1. Повестка дня на XXI век / Организация объединенных наций. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/agenda21.shtml (дата обращения: 24.03.2022).
2. Шаранов Р. В., Соловьев Л. П., Булкин В. В. Существование человека в рамках техносферы // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. – № 1. – С. 31–39.
3. Смит К. Основы прикладной метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 424 с.
4. Климат Санкт-Петербурга и его изменения / под ред. В. П. Мелешко, А. В. Мещерской, Е. И. Хлебниковой. – СПб.: ГГО, 2010. – 256 с.
5. Молодцева А. В. Экологическая оценка воздействия загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения (на примере Ивановской области): автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Владимир, 2013. – 24 с.
6. Государственное природоохранное бюджетное учреждение «Мосэкомониторинг». – URL: <https://mosecom.mos.ru/> (дата обращения: 24.03.2022).
7. Сайт Федеральной службы государственной статистики по Владимирской области. – URL: <https://vladimirstat.gks.ru/> (дата обращения: 24.03.2022).
8. Пепина Л. А., Созонтова А. Н. Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом // Alfabuild. – 2017. – № 1. – С. 99–110.

9. Природа России: национальный портал. – URL: http://www.priroda.ru/regions/air/detail.php?SECTION_ID=&FO_ID=425&ID=5832 (дата обращения: 24.03.2022).
10. Методика инспекторского контроля за выбросами загрязняющих веществ с отработанными газами двигателей автотранспортных средств. – Л.: ГГО им. А. И. Воейкова, 1987. – 76 с.
11. Об утверждении методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73240708/> (дата обращения: 15.04.2022).
12. ГН 2.1.6.3492–17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: Гигиенические нормативы, с изменениями, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 31.05.2018 №37. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. —55 с.
13. Булкин В. В. Оценка содержания оксида углерода на улицах Муром // Материалы III Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К. Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – С. 67–70.

Ю. Е. Бунина

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ КОРРЕКЦИИ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ И ФОНОВ В УСЛОВИЯХ ИХ ЕСТЕСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Представлен метод оценивания влияния гидрометеорологических условий (ГМУ) при коррекции ИК-изображений объектов и фонов в условиях их естественной изменчивости. Данный метод позволяет учесть не только геометрические и теплофизические свойства объекта моделирования при коррекции ИК-изображений, но и уточнить влияние количества поступающей солнечной радиации, в зависимости от географического расположения и времени суток, наличия облачности, относительной влажности воздуха и скорости ветра, при перерасчете значений контрастов радиационных температур поверхностей на предполагаемый период. Представлены примеры результатов коррекции ИК-изображений с учетом ГМУ.

Ключевые слова: метод, гидрометеорологические условия, контраст радиационных температур, ИК-изображение, тепловой баланс, теплопроводность.

ВВЕДЕНИЕ

Оптико-электронные системы формирования, обработки и визуализации инфракрасных изображений находят все более широкое применение в самых различных областях машиностроения. Современные системы технического зрения работают в различных спектрах электромагнитного излучения, однако приоритет отдается инфракрасному диапазону, включающему ближнюю (0,9–1,7 мкм), среднюю (3–5 мкм) и длинноволновую области (8–12 мкм) [1].

Появление фотоприемных устройств со сверхчувствительностью, работающих в ИК-диапазоне, наряду с большими перспективами по применению, повлекло за собой и ряд трудностей в их эксплуатации, среди которых – подготовка «эталонной» информации, необходимой системам технического зрения для выполнения задач распознавания и обнаружения объектов.

Одним из перспективных направлений для решения вышеназванной задачи могут стать построение и уточнение карт пространственного распределения радиационных температур объектов на рассматриваемой местности с учетом географического положения, сезона, времени суток и гидрометеорологических условий и на их основе – коррекция ИК-изображений рассматриваемых объектов и фонов для прогнозируемых ГМУ.

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ И ФОНОВ

Алгоритм включает в себя:

- создание трехмерной модели исследуемого объекта на основе геометрических характеристик, снятых со снимка в оптическом диапазоне;
- выбор исходных данных моделирования – теплофизических и оптических свойств объектов, а также внешних условий функционирования (географическое положение, дата и время, климатическая информация по району);
- определение среднесрочных значений ГМУ местности и оценивание влияния ГМУ на значения контрастов радиационных температур объектов и фонов;

- перерасчет значений контрастов температурных полей по поверхности объекта и фона конечно-разностным методом с учетом оценки влияния ГМУ;
- преобразование и коррекция карт пространственного распределения радиационных температур в ИК-изображение;
- формирование базы данных ИК-изображений объекта моделирования в различных ГМУ. Структура метода представлена на рис. 1.

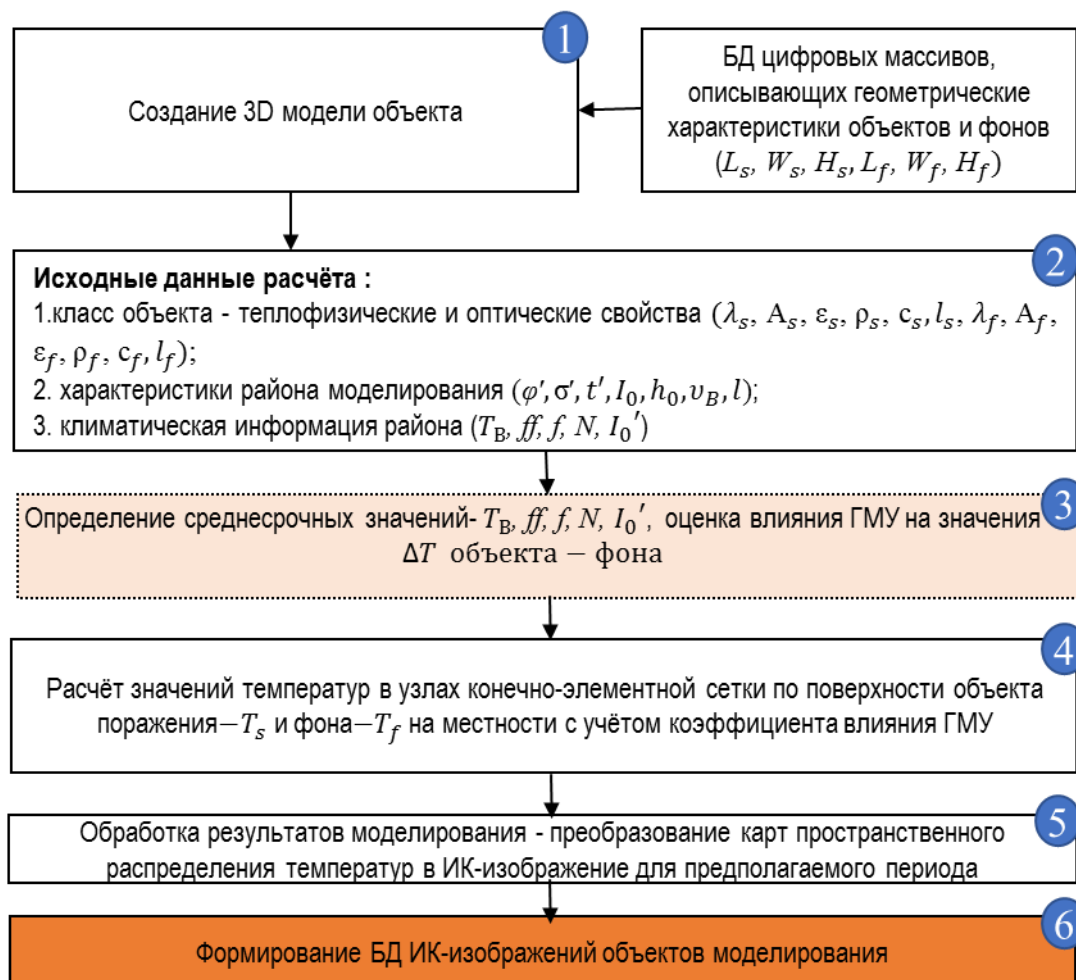


Рис. 1. Структура метода оценивания влияния гидрометеорологических условий при коррекции ИК-изображений объектов и фонов в условиях их естественной изменчивости

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ В СООТВЕТСТВИИ С ПРЕДЛАГАЕМЫМ МЕТОДОМ

1 этап. Создается трехмерная модель исследуемого объекта, выполняется его детализация.

Трехмерные модели заданных объектов и фонов на местности формируются на основе реальных объектов с соблюдением геометрических размеров и необходимого для расчетов уровня детализации (рис. 2) [2, 3]. Для создания трехмерной модели объекта и фона используется САД программа *SolidWorks*.

2 этап. Осуществляется выбор исходных данных для каждого элемента моделируемого объекта – теплофизических и оптических свойств на основе детализации изображения (табл.

1), а также условий функционирования объектов (рис. 2). На рис. 2 для таких объектов введены следующие обозначения: 1 – дорожное покрытие; 2, 7 – грунт; 3 – водоем; 4, 9 – емкость; 5, 6, 10 – асфальт; 11–23 – здания и сооружения.



Рис. 2. Объект моделирования:
а – объект на местности; б – 3D-модель объекта моделирования

Таблица 1

Теплофизические и оптические свойства моделируемого объекта

№	Наименование объекта	Элемент объекта	Материал	Ср, кг/м ³	λ , Вт/м×К	ρ , кг/м ³	Степень черноты
1	Дорожное покрытие		Асфальт	920	0,6	1300	0,93
2	Грунт		Грунт	840	2,3	1900	0,9
3	Пожарный водоем		Вода	4183	0,574	998	0,95
4	Емкость для НП	стенка	Сталь 09Г2С	502,4	16,27	8030	0,905
...

Уточняются характеристики района нахождения объекта, а также климатическая информации за последние 10–12 лет.

3 этап. Определяются среднесрочные значения количества облаков, относительной влажности воздуха и скорости ветра, на основе которых оценивается влияние ГМУ на значения контрастов радиационных температур объектов и фонов.

4 этап. Производится расчет значений радиационных температур объекта и фона на местности с использования конечно-элементной сетки.

Для аппроксимации геометрии модели выбирается тип конечного элемента (КЭ). Выбор типа КЭ обуславливается необходимостью максимально достоверного приближения к объемной геометрии модели [4].

При аппроксимации модели существует возможность регулировать плотность сетки КЭ в областях, где необходимо более точное решение, путем увеличения плотности сетки, а в областях подстилающих поверхностей, где распределение температуры на всей протяженности будет равномерной, – путем уменьшения плотности сетки (рис. 3).

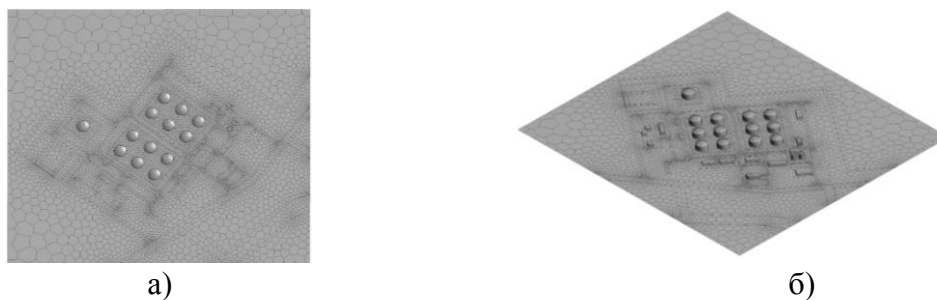


Рис. 3. Сетка КЭ объекта:
а – вид сверху; б – изометрия

Для расчета значений радиационных температур (T_i) в узлах заданной сетки КЭ применяется уравнение нестационарного переноса тепла в частных производных [5] с учетом граничных условий 3-го рода, выраженное в рассматриваемой задаче уравнением теплового баланса земной поверхности. Вычисление значения температур в узлах сетки производится методом конечных элементов по схеме Кранка – Николсона (1). Блок-схема расчета представлена на рис. 4.

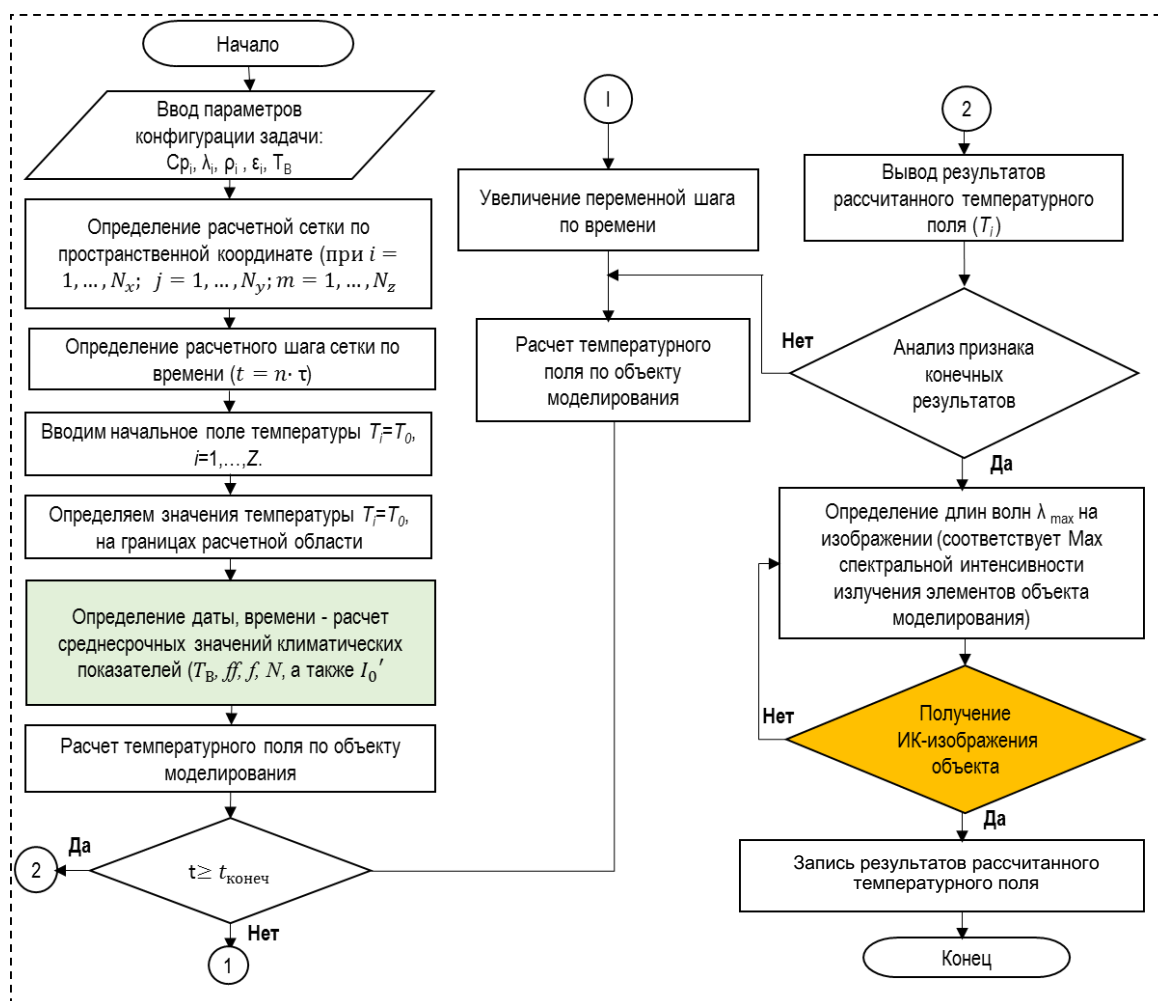


Рис. 4. Блок-схема расчета контрастов радиационных температур по схеме Николса – Кранка

Для решения системы уравнений (1) необходимо учесть критерии однозначности решения, которые содержат геометрические, физические, начальные и граничные условия, где определяются дата и время, производится расчет ГМУ – количества и направления солнечной радиации (S_g), скорости (направления) ветра (ff), температуры воздуха (T_B) и относительной влажности воздуха (f).

Таблица 2

Пример расчета радиационных температур (T_i) моделируемого объекта

№	Наименование объекта	Элемент объекта	S, м ²	T, С	ΔT , С	M, Вт/м ²	J, Вт/ср	Степень черноты
4	Емкость для НП	Стенка	2512	21,8	7,0	429,7	639393	0,905
8	Сооружение	Крыша	504	26,1	2,8	455,2	66502	0,91
9	Емкость для НП	Стенка	628	33,9	1,1	504	9112,5	0,905
11	Сооружение	Крыша	650	28,9	3,9	472,5	90978,5	0,91
12	Сооружение	Крыша	234	28,9	3,9	472,2	32047,2	0,91
.

Пример результатов моделирования радиационных температур объекта на местности (табл. 2), полученных с использованием предложенного метода при различных гидрометеорологических условиях, показан на рис. 5. Приток солнечной радиации (количество и направление) для всех расчетов был одинаковый.

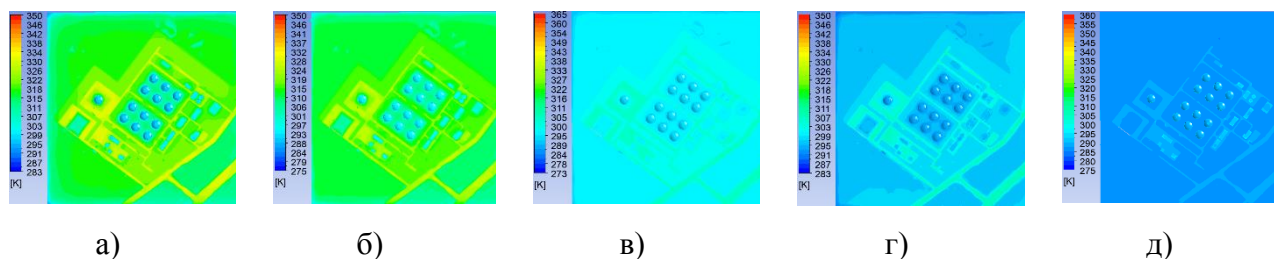


Рис. 5. Карты пространственного распределения полей радиационных температур объектов и фонов при различных ГМУ ($t=12:00$):

- а – $T_g=24^\circ\text{C}$, $N=0$, $ff=0$ м/с, $f=60\%$; б – $T_g=9^\circ\text{C}$, $N=2$, $ff=2$ м/с, $f=60\%$;
 в – $T_g=15^\circ\text{C}$, $N=5$, $ff=5$ м/с, $f=90\%$; г – $T_g=15^\circ\text{C}$, $N=5$, $ff=5$ м/с, $f=90\%$;
 д – $T_g=15^\circ\text{C}$, $N=5$, $ff=5$ м/с, $f=90\%$

5 этап. Преобразуют полученные карты пространственного распределения радиационных температур в ИК-изображение. После получения значений радиационных температур в узлах сетки КЭ, согласно закону смещения Вина (2), производится преобразование значений радиационных температур в длины волн [6]:

$$\lambda_{\max} = b/T, \quad (2)$$

где b – постоянная Вина ($b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К).

6 этап. Скорректированные ИК-изображения объектов для различных ГМУ закладываются в банк данных.

Пример коррекции ИК-изображений объекта моделирования представлен на рис.6.

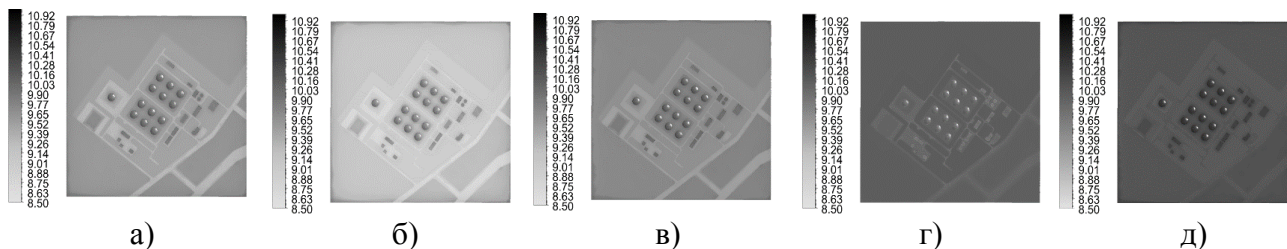


Рис. 6. ИК-изображение объекта моделирования (8–14 мкм) при прогнозируемых среднесрочных значениях ГМУ ($t=12:00$):

- а – $T_g=24^\circ\text{C}$, $N=0$, $ff=0$ м/с, $f=60\%$; б – $T_g=9^\circ\text{C}$, $N=2$, $ff=2$ м/с, $f=60\%$;
 в – $T_g=15^\circ\text{C}$, $N=5$, $ff=5$ м/с, $f=90\%$; г – $T_g=15^\circ\text{C}$, $N=5$, $ff=5$ м/с, $f=90\%$;
 д – $T_g=15^\circ\text{C}$, $N=5$, $ff=5$ м/с, $f=90\%$

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОРРЕКЦИИ

Для проверки сходимости результатов использовался статистический метод оценки результатов наблюдений.

Среднее значение суммы квадратов отклонений значения температуры, полученной при расчетах и в эксперименте, определялось по формуле

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i^{\text{э}} - \Delta T_i^{\text{р}})^2, \quad (3)$$

где n – число контрольных точек;

$\Delta T_i^{\text{э}}$ – значение избыточной температуры, полученное в i -й точке в эксперименте;

$\Delta T_i^{\text{р}}$ – расчетное значение избыточной температуры в i -й точке.

Расчетное значение избыточной температуры определялось по формуле

$$\Delta T_i^{\text{р}} = |T_{\infty}^{\text{р}} - T_i^{\text{р}}|,$$

где $T_{\infty}^{\text{р}}$ – значение температуры окружающей среды.



а)

б)

Рис. 7. Верификация ИК-изображения в природе:

- а – ИК-изображение территории объекта; б – ИК-изображение объекта на местности, полученное численным путем (19 августа 2020 г.)

Анализ полученных данных позволил сделать вывод о сходимости результатов расчета и эксперимента. При этом использовалась таблица квантилей распределения Фишера.

В данном случае при уровне значимости $p = 0,05$ можно принять гипотезу о достаточной сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, разработанный метод оценивания влияния гидрометеорологических условий (ГМУ) при коррекции ИК-изображений объектов и фонов в условиях их естественной изменчивости позволяет моделировать изображения объектов с учетом географического положения, сезона, времени суток и гидрометеорологических условий местности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод оценивания влияния гидрометеорологических условий (ГМУ) при коррекции ИК-изображений объектов и фонов в условиях их естественной изменчивости.

Разработанный метод позволяет создать задел при проведении исследований по моделированию и коррекции ИК-изображений различных объектов при отсутствии возможности проведения фактической съемки.

Список используемых источников

1. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. – М.: Мир, 1988. – 400 с.
2. *Лабунец Л. В.* Цифровые модели изображений целей и реализаций сигналов в оптических локационных системах: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 216 с.
3. *Марчуков В. С.* Теория и методы тематической обработки аэрокосмических изображений на основе многоуровневой сегментации // *Геодезия и Картография.* – М., 2011. – С. 27.
4. *Адрианов В. Н.* Основы радиационного и сложного теплообмена. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
5. *Будыко М. И.* Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 256 с.
6. *Казбеков Б. В.* Совмещение инфракрасных изображений с изображениями видимого диапазона в задачах идентификации подвижных наземных целей с борта беспилотного летательного аппарата // *Труды МАИ.* – 2013. – № 65. – С. 13–17.

Ю. Е. Бунина;
Ю. А. Летучий,
доктор технических наук, профессор

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ КОНТРАСТОВ РАДИАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР ОБЪЕКТОВ И ФОНОВ НА МЕСТНОСТИ

Представлена модель оценивания контрастов радиационных температур объектов и фонов на местности при совместном действии конвекции и излучения. Модель учитывает наличие облачности, относительной влажности и ветра при определении радиационных температур на рассматриваемой местности. Представлены условия однозначности, содержащие начальные, физические, геометрические и граничные условия.

Модель отличается возможностью учета сложной геометрии, многоэлементностью, а также учетом теплофизических свойств используемых при расчетах материалов.

Ключевые слова: контраст радиационных температур, граничные условия, тепловой баланс, гидрометеорологические условия, нестационарная теплопроводность.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных технологий в машиностроении неразрывно связано с исследованием процессов теплопереноса. Результаты этих исследований служат основой анализа режимов внешних тепловых воздействий, под действием которых формируются различные теплофизические характеристики объекта (радиационные температуры и излучательная способность объектов).

Потребность в определении изменения радиационных температур поверхностей различных объектов при влиянии на них солнечной радиации обусловила необходимость разработки моделей и методов их расчета при различных тепловых воздействиях.

В данной работе представлена модель оценивания контрастов радиационных температур объектов и фонов, учитывающая гидрометеорологические условия на местности (облачность, относительную влажность воздуха и скорость ветра).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемая задача исследований может быть реализована путем использования дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных [3], при решении которого методом конечных элементов необходимо учесть условия однозначности. Такие условия содержат геометрические, физические, начальные и граничные условия.

Нестационарный перенос тепла теплопроводностью в объекте моделирования описывается следующим образом [2]:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + \sum q_{w_i}(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

где t – время, с;
 c_i – теплоемкость i -го элемента, Дж/(кг·град);
 ρ_i – плотность i -го элемента, кг/м³;
 T_i – температура i -го элемента, °С;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го элемента, Вт/(м·°С);

$q_{wi}(x, y, z, t)$ – функция внутреннего источника тепла для i -го элемента, Вт/м².

Для поставленной задачи кондуктивного переноса тепла между объектом и средой необходимо определить условия однозначности решения, которые, в свою очередь, определяют геометрические, физические, начальные и граничные условия нагрева или остывания поверхности элементов рассматриваемой термодинамической системы местности.

Геометрические условия ограничиваются формой и размерами нагреваемого тела. Исследуемый объект в данном случае представляется в виде 3D-модели с соответствующими размерами и необходимой детализацией.

Физические условия выражаются через теплофизические характеристики тела λ , ρ , c . Будем считать, что для элементов, входящих в состав объекта моделирования, известны значения параметров теплопроводности (λ), температуропроводности (a), отражательной способности (A) и степени черноты (ϵ). Примем, что коэффициенты тепло- и температуропроводности элементов 3D-модели не зависят от ее фактической температуры.

Временные (начальные) условия задают распределение температуры в теле в начальный момент времени:

$$t=0: T_i=f(x, y, t), \quad (2)$$

где T_i – температура на поверхности i -го элемента.

Граничным условием объекта моделирования при решении (1) является уравнение теплового баланса системы (граничное условие III рода), задающее взаимосвязь между потоком тепла за счет твердой стенки объекта тепловым потоком из окружающей среды (атмосфера и подстилающая поверхность) и представляющее собой выражение [1]

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} = \alpha_i(T_i - T_B) - (1 - A)S_q + \epsilon_i E_A + \epsilon_i \sigma T_i^4, \quad (3)$$

- где
- T_B – температура приземного слоя воздуха, °С;
 - T_i – температура i -го элемента системы «Земля – атмосфера», °С;
 - α_i – приведенный коэффициент теплоотдачи i -го элемента системы «Земля – атмосфера» ($\alpha_i = \alpha_k + \alpha_{л}$, где $\alpha_k, \alpha_{л}$ – коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи), Вт/(м²·град);
 - A – альбедо поверхности i -го элемента системы «Земля – атмосфера»;
 - ϵ_i – интегральный коэффициент излучения i -го элемента системы «Земля – атмосфера»;
 - σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);
 - E_A – излучение атмосферы, Вт;
 - S_q – солнечная радиация, $S_q = S_q(x, y, z, t)$, Вт.

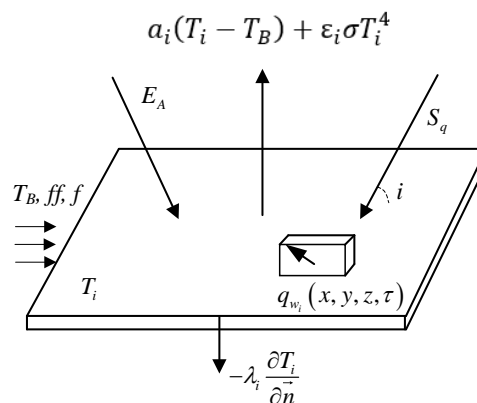


Рис. 1. Схема теплового баланса объекта моделирования с окружающей средой

Проанализируем *особенности формирования теплового баланса на местности с учетом ГМУ*.

Основными гидрометеорологическими условиями, влияющими на распределение радиационных температур объектов и фонов на местности, являются относительная влажность воздуха, количество облачности и скорость ветра (рис. 2).

$$\underbrace{\alpha_i(T_i - T_B)}_{\text{конвекция (ветер, температура окружающей среды)}} - \underbrace{(1 - A)S_q + \varepsilon_i E_A}_{\text{солнечная радиация (облачность, влажность)}} + \underbrace{\varepsilon_i \sigma T_i^4}_{\text{излучение}} = \underbrace{\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \vec{n}}}_{\text{теплопроводность (влажность)}}$$

Рис. 2. Составляющие теплового баланса с учетом ГМУ местности

Рассмотрим подробнее взаимосвязь ГМУ и составляющих теплового баланса.

1. Приходящее излучение на открытую горизонтальную поверхность. Оно складывается из коротковолновой суммарной солнечной радиации S_q и длинноволнового собственного излучения (противоизлучения) атмосферы E_A (2). Солнечная радиация S_q в соответствии с работой [4] определяется выражением

$$S_q = S \cos i, \quad (4)$$

где S – прямая радиация на перпендикулярную к лучам поверхность;

е

$\cos i$ – косинус угла падения солнечных лучей на заданную поверхность, определяемый соотношением (4),

$$\cos i = \cos \alpha \cdot \sin h_0 + \sin \alpha \cdot \cosh_0 \cdot \cos \psi. \quad (5)$$

Здесь α – крутизна склона;

i – угол падения солнечных лучей на склон;

h_0 – высота Солнца;

ψ – разность азимутов Солнца и проекции нормали к склону.

2. Относительная влажность воздуха.

Влияние относительной влажности на собственное излучение атмосферы Земли по формуле Ангстрема [7], входящее в состав (3) и имеющее вид (5), будет определяться выражением

$$E_A = \varepsilon \sigma T_B^4 (0,82 - 0,25 \cdot 10^{-0,0094e}), \quad (6)$$

где e – упругость водяного пара в воздухе, измеренная на высоте 1,5–2,0 м, которая определяется через относительную влажность воздуха f :

$$e = \frac{fE}{100\%}, \quad (7)$$

где E – упругость насыщенного пара (7). Определяется в соответствии с эмпирической формулой Магнуса [7]

$$E = 6.1 \cdot 10^{\frac{7.45T_B}{235+T_B}} \quad (8)$$

где T_B – температура воздуха, °С.

3. Облачность.

Облака нижнего яруса, закрывая солнечный диск, полностью прекращают доступ к земной поверхности прямой солнечной радиации. Так как наибольшее влияние на радиационный режим оказывают облака нижнего яруса, то в модели учитывались значения этого параметра.

Влияние облачности в модели определения контрастов радиационных температур объектов и фонов учитывается введением поправочного множителя для величины эффективного излучения в выражении (4):

$$E_A^{об} = E_A(1 - 0.76 \cdot N), \quad (9)$$

где E_A – эффективное излучение при ясном небе, Вт/м²;

N – степень облачности в долях единицы (где N изменяется в пределах $N=[0...1]$, при $N=0$, состояние небосвода – безоблачное).

Таким образом, приходящее на поверхность излучение (3) с учетом выражения [6] определяется следующим образом:

$$q_{\text{погл}} = (1 - A)S_q + E_A(1 - 0.76 \cdot N). \quad (10)$$

4. Направление и скорость ветра.

Конвективный перенос тепла между поверхностью и воздухом осуществляется в условиях вынужденного и свободного (естественного) перемещения воздуха. Свободная конвекция возникает за счет разности температур в неравномерно нагретом воздухе, которая вызывает соответствующее неравномерное распределение плотности и появление подъемной силы, обуславливающей движение воздуха. Коэффициент теплоотдачи, характеризующий конвективный теплообмен между поверхностью и воздухом, представляет собой сложную функцию потока среды.

Коэффициент теплообмена при вынужденном движении воздуха определяется обычно как зависимость между критериями Нуссельта (Nu) и Рейнольдса (Re)

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}; \quad Re = \frac{ff \cdot l}{\nu}, \quad (11)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·град);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град);

ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с;

l – определяющий размер тела, м.

Вынужденная конвекция осуществляется за счет движения воздушных масс. Граница перехода от ламинарного (без перемешивания слоев $Re \leq 3,5 \cdot 10^5$) режима течения к турбулентному ($Re \geq 5,5 \cdot 10^5$) определяется критическим значением $Re_{кр}$, ($Re_{кр} = 5 \cdot 10^5$) [5].

Ламинарное движение воздуха. При данном движении воздуха ($Re \leq 3,5 \cdot 10^5$) критериальное уравнение для коэффициента теплоотдачи задается выражением

$$Nu = 0.57 Re^{0.5}. \quad (12)$$

За определяющую температуру здесь принята температура T_B , за определяющий размер – теплоотдающая длина поверхности ($l = 1$ м) по направлению потока.

Турбулентное движение воздуха. При значениях Re , превышающих критическое или равное ему ($Re \geq 5,5 \cdot 10^5$) критериальное уравнение для коэффициента теплоотдачи имеет следующий вид:

$$Nu = 0.032 Re^{0.8} \quad (13)$$

Расчет коэффициента теплообмена проводится в следующем порядке: по формуле (11) находят критерий Re , если $Re \leq 3,5 \cdot 10^5$, то – по формуле (12) и если $Re \geq 5,5 \cdot 10^5$, то – по формуле (13); определяют значение критерия Nu и далее – коэффициента теплообмена

$$Nu \frac{\lambda}{l}. \quad (14)$$

Таким образом, интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью и воздухом в выражении (2) определяется коэффициентом теплоотдачи (14).

Выражение теплового баланса земной поверхности с учетом ГМУ примет вид

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \vec{n}} = \alpha_i (T_i - T_B) - (1 - A) S_q + \varepsilon_i E_A \varepsilon \sigma T_B^4 (0,82 - 0,25 \cdot 10^{-0,0094e}) (1 - 0,76 \cdot N) + \varepsilon_i \sigma T_i^4. \quad (15)$$

Исходя из вышеизложенного, для определения радиационных температур (контрастов между выбранными элементами) по поверхности объектов и фонов необходимо решить дифференциальное уравнение в частных производных (1) с учетом граничных условий 2-го рода теплового баланса земной поверхности (15) методом конечных элементов по схеме Кранка – Николсона в конечном числе точек интервала:

$$\begin{cases} c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + \sum q_{w_i} (x, y, z, \tau); \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \vec{n}} = \alpha_i (T_i - T_B) - (1 - A) S_q + \varepsilon_i E_A \varepsilon \sigma T_B^4 (0,82 - 0,25 \cdot 10^{-0,0094e}) (1 - 0,76 \cdot N) + \varepsilon_i \sigma T_i^4; \\ T_i = f(x, y, t). \end{cases} \quad (16)$$

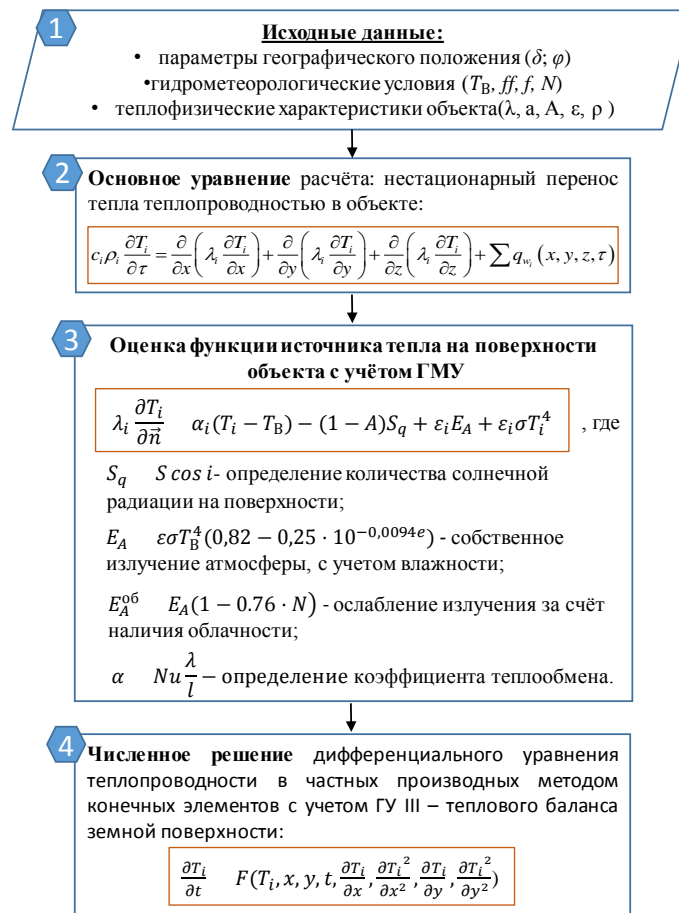


Рис. 3. Структурная схема построения модели оценивания контрастов радиационных температур объектов и фонов на местности

В общем виде структурная схема построения модели контрастов радиационных температур объектов и фонов на местности представлена на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена и математически обоснована модель оценивания контрастов радиационных температур объектов и фонов на местности, учитывающая ГМУ (относительную влажность воздуха, количество облачности и скорость ветра) района моделирования.

Разработанная модель оценивания контрастов радиационных температур может быть использована при определении температур различных объектов и фонов.

Список используемых источников

1. *Будыко М. И.* Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 256 с.
2. Теория тепломассообмена / С. И. Исаев [и др.]; под ред. А. И. Леонтьева. – М.: Высш. шк., 1979. – 495 с.
3. *Кобельков В. Н., Улас В. Д., Федоров Р. М.* Термодинамика и теплопередача / под ред. Р. М. Федорова. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2012. – 328 с.
4. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 750 с.
5. *Михатулин Д. С., Чирков А. Ю.* Конспект лекций по тепломассообмену. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 152 с.
6. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 396 с.
7. *Мухачев Г. А., Шукин В. К.* Термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. шк., 1991. – 480 с.

С. А. Бухаркин*;

О. В. Григорьева**;

кандидат технических наук;

В. Ф. Мочалов**;

Н. В. Шкуров*

*Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа.

**ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

Рассматривается процесс систематического оценивания состояния земель сельскохозяйственного назначения на основе обработки материалов регулярной космической съемки и данных наземных обследований. С целью повышения оперативности и достоверности оценивания разработана и апробирована на практике комплексная модель, обеспечивающая внедрение информационных технологий автоматизированной обработки материалов мультиспектральной космической съемки. Модель предусматривает выполнение следующих основных операций: сбора исходных данных; расчета показателей, характеризующих состояние земель; верификации результатов расчета по данным наземных обследований; оценивания состояния земель, планирования управляющего воздействия и дальнейшего выполнения работ.

Продемонстрирован результат применения комплексной модели на примере оценивания степени зарастания земель сельскохозяйственного назначения. Для практического использования предлагаемого методического аппарата целесообразно сформировать согласованный перечень наиболее важных оцениваемых показателей, характеризующих состояние земель, и приступить к систематизации спектрально-яркостных признаков для автоматизированного оценивания земель с учетом сезонной изменчивости.

Ключевые слова: спектрально-яркостные признаки, контролируемые показатели, мультиспектральная космическая съемка, автоматизированная обработка, верификация, наземные обследования.

ВВЕДЕНИЕ

Оценивание состояния земель может рассматриваться как составная часть мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. В рамках мониторинга предусмотрено привлечение материалов аэрокосмической съемки и данных наземных обследований. Основные операции обработки материалов съемки выполняются в настоящее время в интерактивном режиме, предусматривающем активное участие эксперта-дешифровщика. Вместе с тем в России принято стратегическое направление цифровой трансформации отрасли природопользования, развиваются технологии автоматической идентификации объектов растительного мира на основе комплексной обработки материалов дистанционного зондирования Земли и данных наземных обследований.

Основными целями мониторинга являются оценивание плодородия земель; порядка их эксплуатации; выявление отклонений в состоянии земель, вызванных качеством сельскохозяйственных работ, качеством посадочного материала и удобрений. Вместе с тем важно иметь оперативные и достоверные данные о выявленных отклонениях.

Перечень показателей, характеризующих состояние земель, охватывает широкий спектр научно-практических направлений и зависит от конкретного региона. Предлагаемая модель может найти практическое применение на уровне района или крупного хозяйства.

Для оценивания состояния земель наибольшее распространение в последнее время получили материалы съемки, выполняемой с помощью мультиспектральной аппаратуры, размещенной на борту отечественных космических аппаратов «Ресурс-П», «Канопус-В», а также

на борту зарубежных космических аппаратов *Sentinel-2* и *Landsat-9*. На рис. 1 условно представлены границы спектральных каналов бортовой аппаратуры для перечисленных выше космических аппаратов. Главные достоинства бортовой съемочной аппаратуры заключаются в возможности выполнять измерения отражательных характеристик поверхности несколько раз в течение вегетативного сезона, а также в обеспечении пространственной трансформации и строгой координатной привязки материалов съемки.

Следует отметить, что в предлагаемой методике оценивается состояние земель в пределах конкретных границ кадастровых участков.

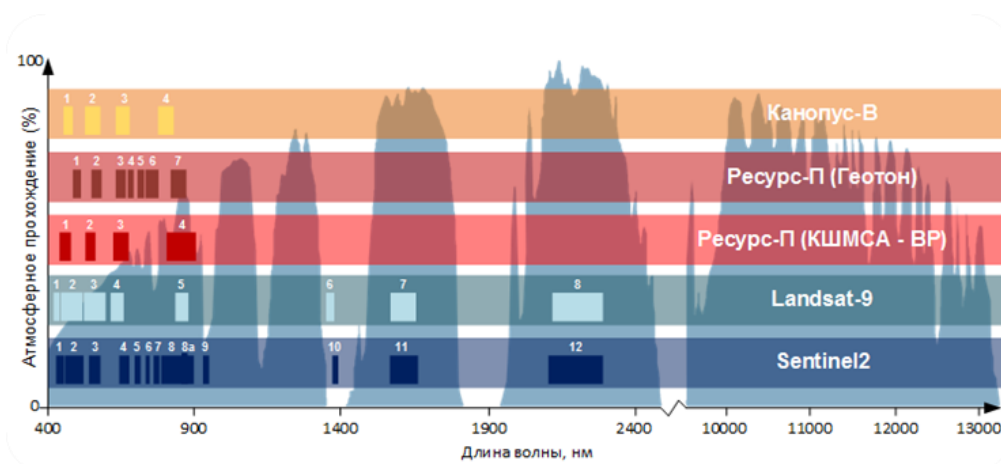


Рис. 1. Границы спектральных каналов съемочной аппаратуры

При автоматизированной обработке материалов мультиспектральной космической съемки принимаются во внимание спектрально-яркостные признаки, основанные на измерении отражательных характеристик элементов ландшафта в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра [1]. Традиционная технология выполнения работ оценивания или инвентаризации земель предусматривает последовательную периодическую реализацию операций, указанных на рис. 2.

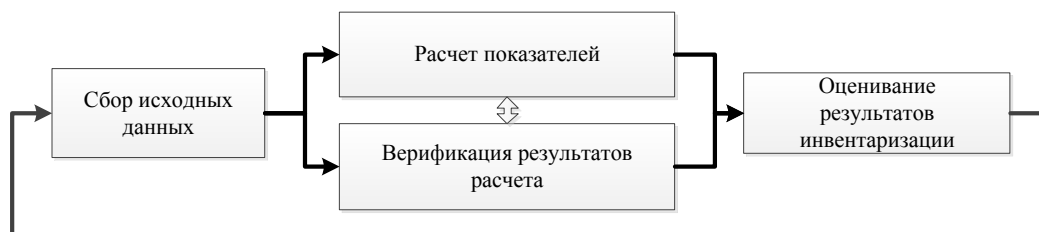


Рис. 2. Операции обработки материалов съемки при оценивании земель

Цель исследования состоит в разработке комплексной модели, обеспечивающей повышение оперативности и достоверности оценивания состояния земель сельскохозяйственного назначения за счет внедрения операций автоматизированной обработки материалов съемки и верификации результатов оценивания на основе анализа данных наземных обследований в заданных точках.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются земли сельскохозяйственного назначения в пределах известных границ кадастровых участков в условиях хозяйственной деятельности или при ее

отсутствии. Показатели, характеризующие состояние земель, определяются на основе расчета и анализа числовых значений спектрально-яркостных признаков [3] или на основе внедрения математической нечеткой кластеризации [6]. Верификация результатов оценивания в пределах заданных в пространстве контуров осуществляется в обоснованно выбранных точках. На рис. 3. представлена структура комплексной модели для решения рассматриваемой задачи.

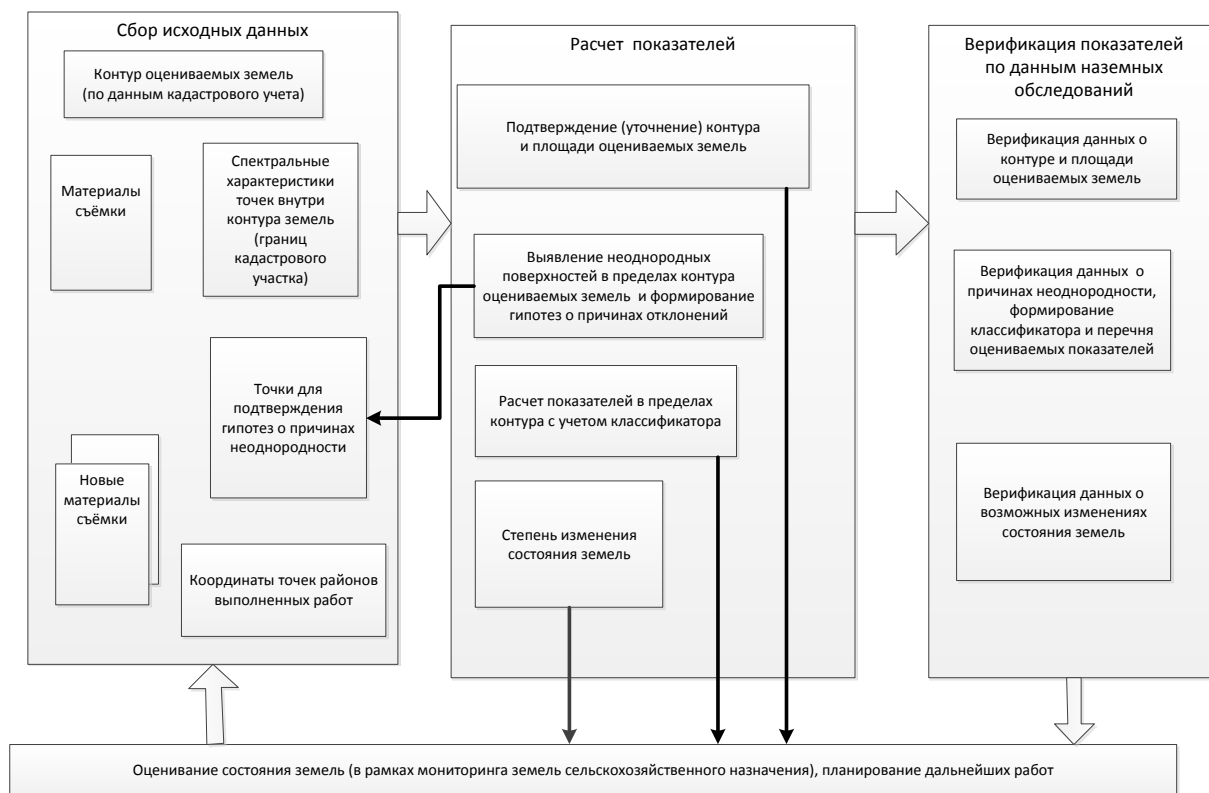


Рис. 3. Структура комплексной модели оценивания земель

В качестве рассчитываемых признаков могут выступать значения индексов [2], наименования и порядок расчета [7, 8] которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень спектрально-яркостных признаков

Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
Simple Ratio (SR) Index	$SR = \frac{NIR}{RED}$
Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2,5 \times \frac{NIR - RED}{(NIR + 6 \times RED - 7,5 \times Blue + 1)}$
Atmospherically Resistant Vegetation Index	$ARVI = \frac{NIR - 2 \times RED - BLUE}{NIR + 2 \times RED - BLUE}$

В табл. 1 при расчете индексов учитывается значение коэффициентов спектральной яркости в спектральных каналах съемочного оборудования, представленного на рис. 1 [4].

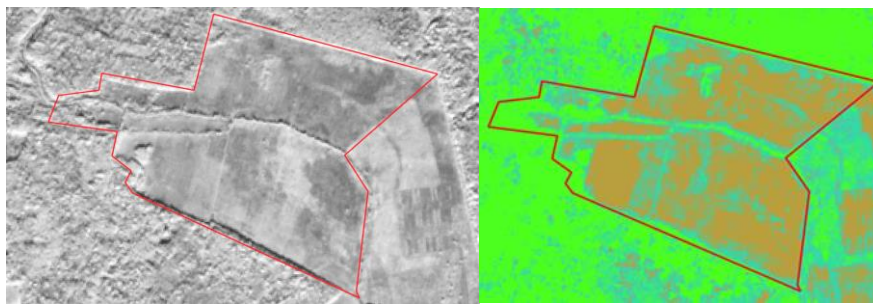
Для идентификации границ условно однородных поверхностей в пределах заданных контуров целесообразно привлекать математический аппарат нечеткой кластеризации [6]. Аппарат обеспечивает автоматизированное выделение определенного количества условно однородных поверхностей. При этом рассчитывается степень принадлежности конкретного элемента ландшафта к выделенным однородным поверхностям.

Результаты расчета показателей отображаются в пространстве с помощью геоинформационных технологий. В пределах оцениваемых поверхностей выбираются точки для выполнения наземных обследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве результата применения модели приводится пример оценивания состояния сельскохозяйственных земель Новгородской области [5]. В пределах границ кадастровых участков проведено оценивание зарастания полей с разделением по трем категориям: полное зарастание, частичное зарастание и отсутствие зарастания. Исходными данными были границы кадастровых участков, а также материалы мультиспектральной космической съемки, выполненной с помощью космического аппарата *Sentinel-2*. Материалы съемки представляются в 13-спектральных каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра с пространственным разрешением от 10 до 60 м. Принимая во внимание, что наиболее информативным периодом съемки для решения поставленной задачи является конец лета, из открытого архива выбраны материалы съемки от 02.10.2020 г.

На рис. 4 представлены исходные материалы съемки и результаты оценивания состояния земель.



*Рис. 4. Исходные материалы и результаты обработки:
слева – красным цветом выделены границы кадастрового участка одного из оцениваемых полей; справа – в пределах границ кадастрового участка зеленым цветом обозначена территория полного зарастания, голубым – частично зарастания, светло-коричневым – отсутствие зарастания*

Результаты оценивания состояния земель прошли верификацию путем проведения наземных обследований. На выбранных контрольных точках подтверждены факты условно полного и частично зарастания или отсутствия зарастания полей. Примеры данных наземных обследований показаны на рис. 5.

В табл. 2 приведены обобщенные результаты оценивания земель по заданным категориям.



Рис. 5. Данные наземных обследований:
а – отсутствие зарастания; б – частичное зарастание; в – полное зарастание

Таблица 2

Обобщенные данные оценивания уровня зарастания полей

№ п/п	Кадастровый номер участка	Площадь, га			
		Общая	Полное зарастание	Частичное зарастание	Отсутствие зарастания
1	53:11:0100201:9	235,3	29,3	26,5	179,5
2	53:11:0100201:11	33,6	22,5	7,3	3,8
3	53:11:0100203:2	509,3	54,8	66,2	388,3
4	53:11:0100203:3	109,5	32,4	24,6	52,5
5	53:11:0100501:4	399,4	1,7	40,3	357,4
6	53:11:0100501:5	52,3	2,7	3,2	46,4
7	53:11:0100701:12	372,6	62,3	229,9	80,4
8	53:11:0100701:13	250,0	9,5	168,1	72,4
9	53:11:0000000:285	165,6	-	21,2	144,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная комплексная модель оценивания состояния земель обеспечивает решение практических задач на основе оперативной автоматизированной обработки материалов мультиспектральной космической съемки.

Достоверность решения задач подтверждается исходя из анализа данных наземных обследований в обоснованно выбранных контрольных точках.

Полученные результаты позволяют дать обобщенную оценку состояния на рассматриваемых территориях для принятия управленческих решений.

Целесообразно провести практическую апробацию предложенной комплексной модели при выполнении плановых мероприятий в рамках регулярного оценивания земель сельскохозяйственного назначения.

На основе предложенной комплексной модели можно также решать ряд военно-прикладных задач, предусматривающих оперативное определение состояния элементов ландшафта, в том числе в условиях активного воздействия и с учетом сезонной изменчивости спектральных отражательных характеристик поверхности.

Список используемых источников

1. *Шовенгердт В. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М., 2005. – 1072 с.
3. *Grigorieva O., Brovkina O. and Saidov A.* An original method for tree species classification using multitemporal multispectral and hyperspectral satellite data // *Silva Fennica*. – 2020. – Vol. 54, № 2. – Article id 10143.
4. Анализ перспектив автоматизированной идентификации элементов ландшафта на основе обработки материалов мультиспектральной космической съемки / Ф. А. Зубарев [и др.]. // *Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» / Институт космических исследований Российской академии наук.* – М., 2021. – С. 27.
5. *Мочалов В. Ф.* Оценивание зарастания земель сельскохозяйственного назначения на основе обработки данных мультиспектральной космической съемки // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат. VI Всерос. научно-техн. конф. Санкт-Петербург, 2021.* – 2021. – С. 39–42.
6. *Мочалов В. Ф.* Оценивание состояния растительности на основе аппарата нечеткой логики // *Информатизация и связь.* – 2020. – № 5. – С. 169–174.
7. *Григорьева О. В., Кузнецов А. Ю., Чапурский Л. И.* Метод создания карт состояния сельскохозяйственных культур и выбора информативных спектральных каналов для их мониторинга // *Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве».* Санкт-Петербург, 16-17 сентября 2015 г. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. – С. 128–133.
8. *Чапурский Л. И., Кудрявцев С. В., Григорьева О. В.* Сравнительный анализ результатов исследования опытных полей пшеницы, полученных различными спектральными приборами // *Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве».* Санкт-Петербург, 16-17 сентября 2015 г. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. – С. 138–141.

И. А. Готюр*,
доктор технических наук, профессор;

Е. А. Коровин*,
кандидат технических наук;

С. В. Чернышев*,
кандидат технических наук;

Г. Г. Щукин* **,
доктор физико-математических наук, профессор;

И. Е. Юсупов***,
кандидат физико-математических наук

*ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

**Муромский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром.

***Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СЕТЬ ДАТЧИКОВ МОНИТОРИНГА ГРОВОЙ АКТИВНОСТИ

В статье представлены результаты работы, направленной на создание многопозиционной экспериментальной сети мониторинга грозовой активности. Приведены расчеты зон равной точности для вариантов реализации угломерного и разностно-дальномерного методов определения координат. Представлены первые результаты оценивания погрешностей определения датчиками направления на молниевый разряд.

Ключевые слова: мониторинг гроз, определение координат молниевых разрядов, пеленг, триангуляция, датчик молний, зоны равной точности.

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение молниевых разрядов (МР), как представляющих непосредственную опасность, так и являющихся предвестниками других, не менее опасных атмосферных явлений (шквал, град), в настоящее время не представляется без автоматических приборов, функционирующих автономно или в составе автоматизированных систем гидрометеорологического обеспечения [1, 2]. Современные датчики реализуют обнаружение, определение координат и других характеристик МР в основном за счет анализа параметров атмосфериков – электромагнитного излучения, формируемого перемещением заряда по каналу молнии [3]. Наибольшее распространение получили датчики молний (ДМ), принимающие электромагнитное излучение МР в диапазоне 300–350000 Гц. Это обусловлено двумя факторами: максимумом спектральной плотности мощности излучения и дальностью распространения электромагнитных волн в данном диапазоне. Для определения координат ДМ могут измерять время приема атмосферика, направление (пеленг) и расстояние до МР. Датчики молний, реализующие оценивание пеленга и расстояния до МР, применяются как автономные, определяющие координаты разрядов из одного пункта [4, 5]. Как правило, радиус действия одно-пунктовых датчиков ограничен значением 100 км. Определение направления на МР ДМ, объединенными в сеть, позволяет использовать триангуляцию. Такие системы называются пеленгационными. Впервые эти системы появились в середине 20-х годов прошлого века и продолжают успешно эксплуатироваться и в настоящее время. Основным достоинством пеленгационных систем является относительная простота реализации и высокая точность определения координат при длине базы (расстояние между ДМ) до 150 км. При большем расстоянии между ДМ предпочтительно использовать разностно-дальномерный метод определения координат МР, основанный на регистрации времени приема атмосферика [6]. Ме-

стоположение рассчитывается из разности расстояний от датчиков до МР, пропорционального разности времени фиксации атмосферика. Разность расстояний позволяет построить поверхность положения – гиперboloид вращения, поэтому данный метод определения координат часто называют гиперболическим. Широкое распространение гиперболический метод получил несколько позже, в связи со сложностью реализации синхронизации времени отдельных датчиков сети.

Основные характеристики ДМ, позволяющие своевременно выявлять, а в ряде случаев и прогнозировать опасные явления в заданном районе, – это вероятность обнаружения и точность определения координат МР различных типов: облако-земля (О-З) либо облако-облако (О-О). Вероятность обнаружения определяется чувствительностью ДМ и требуемой дальностью действия. На основе данных о распределении амплитуд атмосфериков, действующих высот антенн и чувствительности приемных трактов ДМ, вероятность обнаружения может быть рассчитана с достаточной точностью. Погрешности оценок местоположения МР зависят от выбранного метода определения координат, числа, взаимного и относительно МР расположения ДМ (геометрического фактора), точности оценивания координатно-информативных параметров отдельными датчиками [6]. Теоретически оценить погрешности определения координат МР можно лишь приблизительно.

Точность определения координат МР различными системами может быть подтверждена практически путем искусственной инициации разрядов либо путем их регистрации при ударах в высотные объекты, с известными координатами и оборудованные соответствующей измерительной аппаратурой [1]. Для оценки точности локации МР вновь создаваемыми ДМ и сетями мониторинга грозовой активности могут также использоваться ранее развернутые системы с более высокими подтвержденными характеристиками. Особенно это касается однопозиционных ДМ, точность определения координат МР которыми в большей части зависит от оценок расстояния, основанных на модели разряда в дипольном приближении, и значительно ниже точности многопозиционными систем. К сожалению, на территории России системы мониторинга грозовой активности создавались стихийно, а их заявленные характеристики не подвергались серьезным проверкам. Представленная работа посвящена описанию замысла и первого этапа создания экспериментальной сети датчиков мониторинга грозовой активности на территории Ленинградской области, позволяющей с потенциально высокими вероятностью и точностью определять координаты МР в задачах контроля характеристик большебазовых систем, алгоритмов дальнометрии однопунктовых ДМ, а также апробирования методов прогнозирования МР [7], разрабатываемых в рамках исследований на базе Геофизической обсерватории ВКА имени А. Ф. Можайского [8].

ДАТЧИКИ МОЛНИЙ

Алгоритмы сверхкраткосрочного прогнозирования грозовой деятельности, разрабатываемые на основе экспериментальных данных, получаемых в Геофизической обсерватории ВКА имени А. Ф. Можайского, основаны, в частности, на данных о местоположении и времени МР, определяемых фазовым анализатором грозоопасности (ФАГ-2Н) [9] и грозопеленгатором-дальномером – автономным ГДА-1. В штатном режиме данные приборы позволяют оценивать направление и расстояние до МР. Направление, согласно заявленным характеристикам, индицируется с шагом 45 градусов, а диапазон расстояний разбит на три части: 0–9/9–19/19–56 км. Характеристики этих приборов ограничивают возможности детального исследования электрически активных облаков и не позволяют оценивать грозовую деятельность за пределами установленного радиуса действия.

Для обеспечения возможности получения направления и расстояния до МР с большей разрешающей способностью, а также определения с высокой точностью времени приема атмосфериков в Академии имени А. Ф. Можайского создан универсальный датчик мониторинга

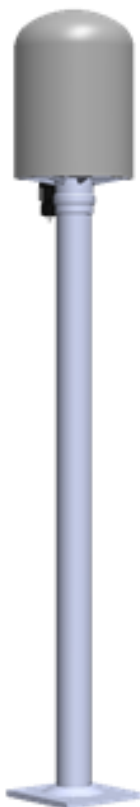


Рис. 1.
Универсальный датчик молний

га грозовой активности (рис. 1) [3]. Универсальность датчика заключается в обеспечении возможности одновременного оценивания трех параметров положения МР: азимута, расстояния и времени приема атмосферика, позволяющих реализовать однопунктовый угломерно-дальномерный и многопунктовые угломерный и разностно-дальномерный методы определения координат. Такая возможность достигается за счет осуществления оценивания параметров электрической и магнитной составляющих атмосфериков в диапазоне частот 300–127000 Гц. Нижняя граница диапазона в идеальных условиях может начинаться с нулевой частоты. Реальные условия работы ДМ предполагают наличие помех, вызванных электрической сетью частотой 50 Гц. Гармоники сетевой помехи имеют значительную амплитуду и не позволяют эффективно работать в диапазоне 0–300 Гц. Этот факт ограничивает верхнюю границу диапазона оценивания расстояния до МР радиусом 100 км фазовым методом [5], сущность которого заключается в определении зависящей от расстояния до МР разности фаз магнитной и электрической составляющих атмосферика на различных частотах. По мере увеличения расстояния формы фиксируемых ДМ составляющих атмосферика становятся идентичными, а различие фаз перемещается в нижнюю область диапазона частот. Верхняя граница частотного диапазона выбрана из соображений обеспечения достаточной точности определения времени приема атмосферика. Точность фиксации времени приема обеспечивается встроенным навигационным модулем GLONASS, имеющим выход сигнала секундной метки, и алгоритмами однозначной идентификации параметров атмосферика. Оценки погрешностей синхронизации времени, вызванных, в том числе, достаточно высокой нагрузкой на вычислительную платформу, реализующую цифровую обработку сигналов, позволя-

ют заявить о микросекундной точности, вполне достаточной для использования датчика в гиперболических системах, обеспечивающих определение координат МР внутри рабочей зоны с точностью до 300 м. Определение направления на МР производится амплитудным методом, с применением двух взаимно перпендикулярных рамочных (ферритовых) и одной электрической антенн, объединенных в компактную конструкцию (рис. 2). Электрическая антенна состоит из двух круглых проводящих пластин, соединенных между собой четырьмя вертикальными стойками. Магнитные антенны представляют собой проволочные катушки на ферритовых стержнях, устанавливаемых в стойки между пластинами электрической антенны. Действующая высота антенн рассчитывалась, исходя из соображений обеспечения отношения уровня полезного сигнала к шуму входных усилительных каскадов 10/1 при условии приема 90% атмосфериков в радиусе 300 км. Резонансная частота ферритовой антенны была смещена за диапазон принимаемых частот путем секционирования катушки.

Сигналы от двух магнитных и одной электрической антенн усиливаются и преобразуются в цифровой вид для дальнейшей обработки с целью определения основных параметров атмосферика. Для усиления сигналов используются операционные усилители IC1 и IC2 (рис. 3).

Три аналоговых тракта усиления входного сигнала выполнены идентично в виде двухкаскадной схемы. Сигнал от антенн через разъем X2 поступает на первый каскад. В первом каскаде, собранном на сдвоенном операционном усилителе IC1A, IC1B, входной сигнал усиливается в 2 раза. Емкость электрической антенны с резисторами смещения R4, R5 образуют фильтр верхних частот первого порядка с частотой среза порядка 1,5 кГц. Для снижения этой частоты до требуемого значения 300 Гц в схему включены конденсаторы C8, C9. Второй каскад реализован на операционном усилителе IC2, образующем фильтр нижних частот с частотой среза 128 кГц для подавления внеполосных помех и устранения эффекта наложения частот на этапе аналого-цифрового преобразования. Усиленный и ограниченный по полосе

аналоговый сигнал через разъем X1 поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

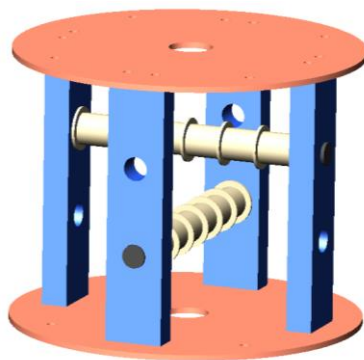


Рис. 2. Компактная приемная антенная система

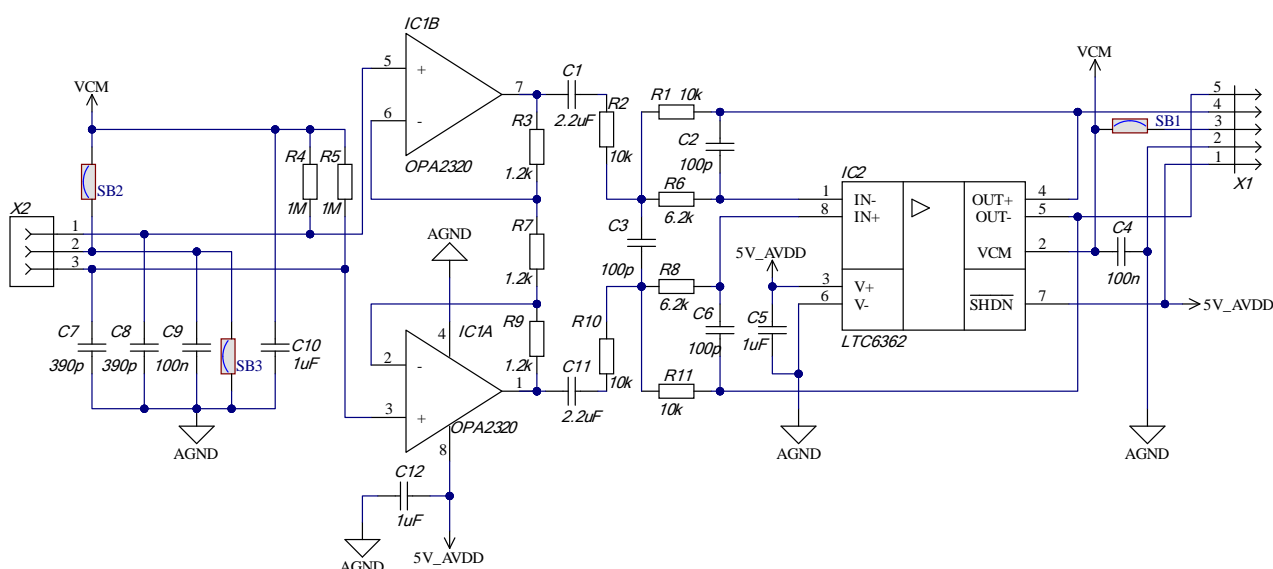


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема аналогового тракта

Преобразование аналогового сигнала в цифровой производится четырехканальным 24-битным АЦП с частотой дискретизации 256000 выб/с. Разрядность применяемого АЦП позволяет обеспечить достаточный для обработки как близких, так и дальних атмосфериков динамический диапазон. Оценивание основных параметров атмосфериков реализуется в 32-разрядном микроконтроллере после предварительной фильтрации ложных (помеховых) сигналов. Передача данных на ПЭВМ обработки и визуализации данных реализована с применением технологии *Fast Ethernet* по протоколу UDP. Электропитание осуществляется по технологии *Power over Ethernet* (PoE), что позволяет использовать для подключения датчика всего один кабель.

ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МР

Точность определения координат МР в значительной степени зависит от конфигурации системы (взаимное расположение ДМ) и реализуемого метода [6]. С целью снижения погрешностей оценок координат МР рассчитаны зоны равной точности. Зоны равной точности

наглядно демонстрируют влияние геометрического фактора (расположения МР относительно ДМ) на точностные характеристики систем определения координат МР с учетом погрешностей определения координатно-информативных параметров ДМ.

Выбор мест установки ДМ определялся следующими факторами: минимальным влиянием геометрического фактора внутри рабочей зоны системы, отсутствием мешающих определению направления на МР факторов и наличием надежного канала связи. Мешающими при определении направления на МР с использованием магнитных антенн факторами являются расположенные в непосредственной близости от ДМ высоковольтные линии электропередачи, трансформаторные подстанции, высокие деревья и сооружения. Всего было определено пять мест установки ДМ:

1. НОЦ ВКА имени А. Ф. Можайского 59.95631, 30.28847;
2. Кафедра радиофизики СПбГУ (Петергоф) 59.88134, 29.82509;
3. Поселок Кировское (Выборгский район) 60.43004, 29.907964;
4. Деревня Вартемяги (Всеволожский район) 60.1708, 30.31895;
5. Поселок Воейково (Всеволожский район) 59.95014, 30.70945;

Исходя из технических возможностей универсального датчика мониторинга грозовой активности и мест установки, был проведен расчет зон равной точности создаваемой сети (рис. 4). На рис. 4, а и б представлено расположение мест установки датчиков с зонами равной точности разностно-дальномерной и угломерной сетей соответственно. Зона с наибольшей точностью (погрешность менее 500 м) определения координат МР обозначена фиолетовым цветом. Зона определения координат МР с наихудшей точностью (погрешность составляет от 2000 до 2500 м) обозначена красным цветом.

Расчет ошибок определения координат МР грозопеленгационной сетью проводился с учетом инструментальной точности датчика, составляющей 1 градус. В качестве исходных данных для расчета погрешностей разностно-дальномерной сети была принята величина 4 мкс, что соответствует точности определения времени регистрации атмосферика.

Расчет зон равной точности пеленгационного и разностно-дальномерного методов для планируемой конфигурации сети и характеристик датчиков позволил определить первый метод как наиболее предпочтительный для создаваемой системы.

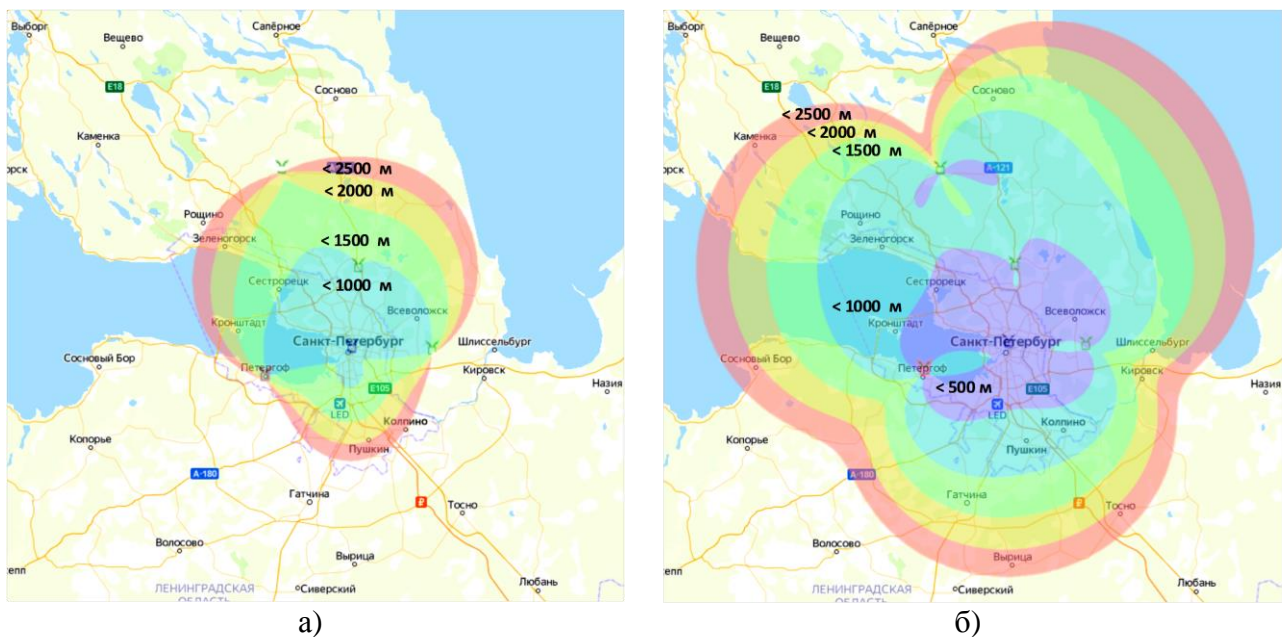


Рис. 4. Зоны равной точности разностно-дальномерной (а) и угломерной (б) систем определения координат МР

Несмотря на меньший охват территории с заданной точностью определения координат МР, разностно-дальномерный метод может применяться параллельно угломерному для повышения точности внутри сети. Кроме того, использование разностно-дальномерного метода будет целесообразным при разнесении датчиков на большие расстояния с целью расширения рабочей зоны.

РАСЧЕТ КООРДИНАТ МР

Датчики молний экспериментальной сети мониторинга грозовой активности после обнаружения и измерения основных параметров атмосферика передают полученные результаты для расчета координат на ПЭВМ со специализированным серверным программным обеспечением (ПО). Серверное ПО сети датчиков мониторинга грозовой активности включает в себя три части: прием данных от датчиков, расчет координат МР, конечное представление для пользователя. Прием данных от ДМ осуществляется в автоматическом режиме по UDP протоколу в формате JSON. При этом ДМ передают два типа сообщений: данные состояния датчика и данные МР.

Указанные выше состояния датчика передаются, при отсутствии данных МР, раз в минуту. Отсутствие данных состояния (при отсутствии данных МР) означает неисправность канала связи либо выход датчика из строя. Данные МР передаются ДМ по факту регистрации МР. Все сообщения ДМ записываются в базу данных для последующей обработки.

Для расчета координат используется пеленгационный метод расчета координат МР (угловая засечка [10]). Выбор датчиков, участвующих в расчете координат МР, осуществляется по расстоянию между датчиками и по времени регистрации атмосферика. Все ДМ, принявшие электромагнитное излучение молнии, определяют пеленг на МР и время обнаружения атмосферика и отправляют данные на сервер. В серверном ПО выбирается набор данных, максимальная разница времен внутри которого не превышает значения 400 мкс. Это обусловлено тем, что расстояния между ДМ в сети не превышают 120 км и радиосигнал проходит его за 400 мкс.

В пеленгационной системе местоопределения минимальное-избыточное число датчиков, необходимое для однозначного определения координат МР, равно трем. Это связано с тем, что в двухпунктовой пеленгационной системе при нахождении излучателя на одной оси с базой системы ошибка местоопределения становится бесконечной. В случае положения МР вне прямой, соединяющей два датчика, определение координат возможно по двум пеленгам. Наименьшая ошибка определения координат достигается при перпендикулярном пересечении линий пеленгов на МР, при этом вес расчета координат двухпунктовым методом равен синусу этого угла.

Если набор содержит количество датчиков больше трех, то он разбивается на всевозможные комбинации троек и выбирается та тройка датчиков, которая дает минимальную ошибку расчета, определяемую геометрическим фактором. По пеленгам этих датчиков находится весовой центр, который и считается местоположением МР.

Суть угловой засечки заключается в следующем. Известными считаются широты φ_1 и φ_2 и разность долгот λ пунктов наблюдения, а также азимуты α_{13} и α_{23} на излучатель. Сначала вычисляют сферическое расстояние σ_{12} и азимуты α_{12} и α_{21} между пунктами наблюдения:

$$\operatorname{tg}\alpha_{12} = \frac{\sin\lambda\cos\varphi_2}{\cos\varphi_1\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1\cos\varphi_2\cos\lambda},$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{21} = \frac{\sin\lambda\cos\varphi_1}{\cos\varphi_1\sin\varphi_2\cos\lambda - \sin\varphi_1\cos\varphi_2},$$

$$\operatorname{tg}\sigma_{12} = \frac{\cos\varphi_2 \sin\lambda \sin\alpha_1 + (\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\lambda) \cos\alpha_1}{\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\lambda}.$$

Затем определяют углы:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \alpha_{12} - \alpha_{13}, \\ \beta_2 &= \alpha_{23} - \alpha_{21}.\end{aligned}$$

Для вычисления сферического расстояния σ_{13} от первого пункта наблюдения до излучателя применяются следующие формулы:

$$\begin{aligned}\operatorname{ctg}\sigma_{13} &= \frac{\sin\beta_1 \cos\beta_2 + \cos\beta_1 \sin\beta_2 \cos\sigma_{12}}{\sin\beta_2 \sin\sigma_{12}}, \\ \sin\sigma_{13} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2\sigma_{13}}}, \\ \cos\sigma_{13} &= \operatorname{ctg}\sigma_{13} \sin\sigma_{13}.\end{aligned}$$

Для контрольного вычисления координат излучателя используются формулы для сферического расстояния от второго пункта наблюдения до излучателя:

$$\begin{aligned}\operatorname{ctg}\sigma_{23} &= \frac{\cos\beta_1 \sin\beta_2 + \sin\beta_1 \cos\beta_2 \cos\sigma_{12}}{\sin\beta_1 \sin\sigma_{12}}, \\ \sin\sigma_{23} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2\sigma_{23}}}, \\ \cos\sigma_{23} &= \operatorname{ctg}\sigma_{23} \sin\sigma_{23}.\end{aligned}$$

В результате решения прямой геодезической задачи получаем искомые координаты МР. Угол пересечения линий пеленгов определяется как модуль разности пеленгов. Из полученного набора данных исключаются пеленги ДМ, расстояние от которых до МР менее 10 км. Из оставшихся данных выбираются три координаты угловых засечек, имеющие больший вес (синус угла пересечения линий пеленгов). Далее с учетом веса координат вычисляется весовой центр треугольника, являющийся координатами МР.

Для конечного пользователя необходимо в первую очередь знать время и координаты молниевой вспышки, ее тип (облако-земля или внутриоблачный). Координаты вспышки отображаются в виде точки на карте местности, время вспышки отмечается цветом. Доступ к данным экспериментальной сети мониторинга грозовой активности будет реализован с применением веб-технологий и доступен для любого пользователя сети Интернет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕЛЕНГОВАНИЯ

Установка первых двух ДМ в пунктах НОЦ ВКА имени А. Ф. Можайского (59.95631, 30.28847) и поселка Кировское (60.43004, 29.907964), а также запуск тестовой версии серверного ПО позволили провести сопоставление пеленгов на МР. В качестве эталонных данных использовались координаты МР, рассчитываемые любительской системой *blitzortung* [11]. Расстояние от ДМ до грозового фронта превышало 500 км, поэтому вероятность обнаружения была несколько снижена. Стоит отметить хорошую согласованность по времени обнаружения МР универсального датчика и системы *blitzortung*, упрощающую сопоставление данных и подтверждающую надежность работы модуля синхронизации времени.

На рис. 5 представлены данные сопоставления за одни сутки. Погрешность установки направления на север вызвала систематическую ошибку 30° .

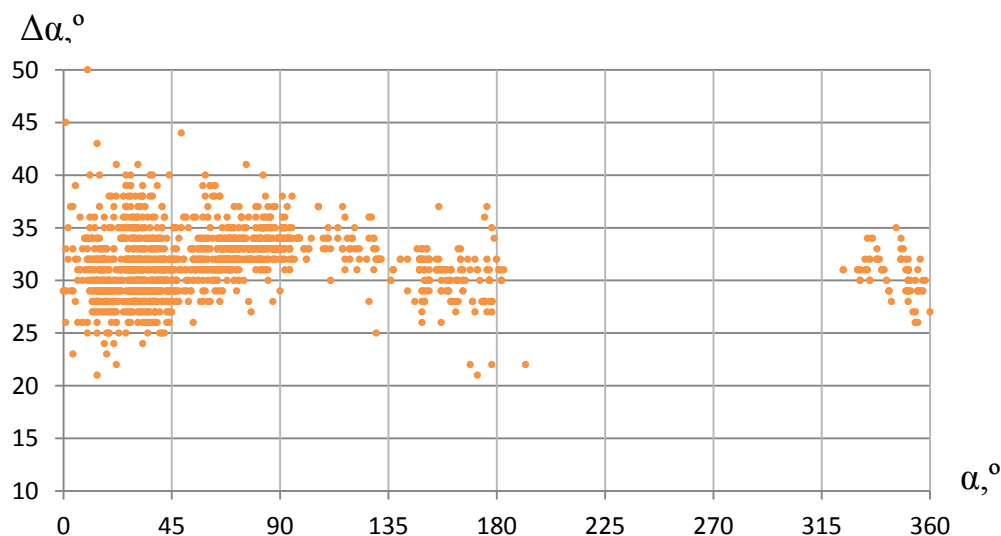


Рис. 5. Погрешности пеленгов универсального датчика мониторинга грозовой активности, установленного на крыше НОЦ ВКА имени А. Ф. Можайского (59.95631, 30.28847)

Случайные погрешности определяются низким отношением сигнал/шум при регистрации МР на большом расстоянии, а также влиянием сигналов в частотном диапазоне ДМ. Кроме систематической ошибки, вызванной погрешностью установки ДМ, наблюдается зависимость погрешности определения направления на МР от значения пеленга. Это объясняется неидентичностью трактов преобразования магнитной составляющей атмосферы и требует более тщательной калибровки ДМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создаваемая на территории Ленинградской области экспериментальная сеть мониторинга грозовой активности в пределах рабочей зоны теоретически имеет высокую вероятность обнаружения и большой потенциал точности определения координат МР. Вместе с тем для успешного функционирования сети требуется учет систематических и случайных погрешностей измерений параметров атмосфериков ДМ. Несмотря на высокую инструментальную точность универсального датчика мониторинга грозовой активности, реальные измерения пеленгов на МР показали значительное влияние внешних условий на результаты.

В ближайшей перспективе, для приближения к потенциально возможной точности определения координат МР, необходимо продолжить работы по совершенствованию алгоритмов пеленгования в направлении повышения помехоустойчивости и работы в условиях низких отношений сигнал/шум.

Работа подготовлена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00378 (<https://rscf.ru/project/21-19-00378>).

Список используемых источников

1. Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques / A. Nag [et al.] // *Earth Sp. Sci.* – Apr. 2015. – Vol. 2, № 4. – P. 65–93.
2. *Cummins K.L. and Murphy M.J.* An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.* – 2009. – № 51(3). – P. 499–518.
3. *Денисенков Д. А., Коровин Е. А.* Универсальный датчик мониторинга грозовой активности // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2016. – Вып. 653. – С. 164–168.
4. *Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С.* Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 220 с.
5. *Кононов И. И., Юсупов И. Е., Кандарацков Н. В.* Анализ однопунктовых методов пассивной локации грозового разряда // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2013. – Т. 56, №11-12. – С. 875–888.
6. *Сайбель А. Г.* Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1958. – 56 с.
7. *Murphy M.J. and Holle R.L.* Warnings of cloud-to-ground lightning hazard based on combinations of lightning detection and radar information // *Proceedings, 19th Intl. Lightning Detection Conf., Tucson, AZ, Vaisala Inc.* – 2006.
8. Состояние и перспективы создания геофизической обсерватории военно-космической академии имени А. Ф. Можайского / И. А. Готюр [и др.] // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2018. – Вып. 662. – С. 186–189.
9. *Васильев В. А.* Антенны портативных приемников. – М.: Энергия, 1973. – 39 с.
10. ООО «Цифровой Дракон» [сайт]. – URL: <http://www.digital-dragon.ru> (дата обращения: 25.05.2022).
11. *Морозов В. П.* Курс сфероидической геодезии. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1979. – 296 с.
12. Network for Lightning and Thunderstorms in Real Time. – URL: http://en.blitzortung.org/live_lightning_maps.php (дата обращения: 25.05.2022).

А. Н. Григорьев,
доктор технических наук, доцент;
Д. С. Дементьев;
Л. Г. Зуев

ПОДХОД К УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Исследование посвящено разработке подхода к повышению пространственной детальности снимков, получаемых средствами дистанционного зондирования с использованием генеративно-состязательной нейронной сети. Разработанная процедура повышения детальности позволяет улучшить качество изображений без негативного размытия границ объектов, существенно проявляющегося в результате использования стандартных методов. Исследование основано на анализе процедуры обучения нейронной сети и предложенном пути усовершенствования существующей нейронной сети, обеспечивающей повышение детальности изображения. Представлены алгоритмы обучения генератора и дискриминатора, формирующие применяемую генеративно-состязательную нейронную сеть. Модификация генеративно-состязательной сети выполнена за счет внедрения показателя потерь, основанного на модели дополнительной сверточной нейронной сети. Описана программная реализация, и представлены результаты практической отработки предложенного подхода на реальных изображениях, полученных оптико-электронными средствами дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, оптико-электронная съемка, изображение, суперразрешение, искусственная нейронная сеть, генеративно-состязательная сеть, пространственная детальность.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение пространственной детальности изображений, которое также называется задачей суперразрешения, является одной из типовых процедур при повышении качества данных дистанционного зондирования Земли. Алгоритмы повышения детальности отдельного изображения, к которым относится метод, основанный на использовании генеративно-состязательной сети SRGAN (*Super-Resolution Generative Adversarial Network*), находят широкое применение в области получения снимков различных объектов мониторинга на земной поверхности с использованием беспилотных летательных и космических аппаратов. Особый интерес в задаче повышения пространственного разрешения изображения представляют свойства зрительного восприятия объектов малого размера. Количество и размеры объектов на изображении и их характер очень разнообразны, что требует более тонкой настройки и обучения модели нейронной сети.

Для повышения пространственной детальности изображения подавляющее большинство современных алгоритмов используют нейросетевые методы, основанные на применении показателя потери – среднеквадратического отклонения MSE [1] в виде метрики для измерения качества функционирования модели, с целью максимизации оценки PSNR (пикового отношения сигнал/шум) [2] и значения SSIM (показателя структурного сходства) [3]. Практическая отработка существующих методов показывает, что при использовании наиболее применимой нейронной сети *SRResNet* с учетом потери MSE наблюдается размытие резких контуров объектов на изображении [4]. Настоящее исследование основывается на гипотезе, что использование функции потери позволяет сравнивать более высокоуровневые характеристики изображения с учетом промежуточной активации предварительно обученной сверточной нейронной сети. В качестве такой нейронной сети предлагается использовать архитектуру VGG-19 [5].

Таким образом, тема исследования, связанного с проработкой подхода к улучшению качества данных дистанционного зондирования Земли с использованием генеративно-состязательной нейронной сети, является актуальной. В рамках исследования решаются задачи по анализу процедуры обучения модели нейронной сети, обоснованию и использованию функции потерь для предварительно обученной модели нейронной сети VGG-19, а также модификации алгоритма обучения путем внедрения алгоритма дискриминатора, который предназначен для регулировки параметров работы генератора суперразрешения.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В общем случае формирование набора данных для обучения используемой нейронной сети требует проведения анализа характера изображений, для которых будет применяться алгоритм повышения качества. Одним из ключевых свойств получаемого изображения является пространственная детальность. Указанное свойство является важным в силу того, что оно определяет качество выделения контуров объектов на снимке при последующей визуальной или автоматизированной обработке и интерпретации.

Исследуемая процедура повышения детальности изображения основана на нейронной сети SRResNet, которая является одним из известных средств повышения детальности отдельного изображения. Реализованный в сети SRResNet метод обеспечивает высокое качество масштабирования снимков низкой пространственной детальности. Принцип повышения детальности основан на том, что нейронная сеть при масштабировании изображения анализирует так называемое скрытое пространство изображения, выявляя признаки объекта на изображении, например тело человека или форму автомобиля. На снимке высокого пространственного разрешения выявление признаков в скрытом пространстве затруднено вследствие большого разнообразия объектов на изображении. Поэтому требуется коррекция существующего метода для создания алгоритма, выявляющего большое количество и малый размер признаков в скрытом пространстве изображения. Разработанная процедура, основанная на нейронной сети SRResNet, включает следующие этапы:

- создание расширенной обучающей выборки;
- внедрение алгоритма дискриминатора в процесс обучения;
- использование функции потерь для более высокоуровневых признаков изображения;
- настройку параметров модели;
- обучение модели с использованием полученного алгоритма;
- повышение пространственного разрешения снимка.

Предлагается расширение обучающей выборки путем подготовки космических снимков, изображения которых различаются в 4 раза по показателю пространственного разрешения. Это предоставляет возможность обучения модели для четырехкратного повышения пространственной детальности исходного изображения.

Вычисление среднеквадратической ошибки MSE, используемой при стандартном подходе, выполняется по известной формуле

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (1)$$

где y_i – элемент оригинального изображения;

\hat{y}_i – элемент изображения после повышения детальности, соответствующий элементу y_i .

Минимизация среднеквадратической ошибки MSE приводит к повышению пикового отношения сигнал/шум PSNR, но это относится к отдельным пикселям и не характеризует зрительное восприятие всего изображения. Для выявления более высокоуровневых признаков в скрытом пространстве изображения предлагается использовать предварительно обученную

модель сверточной нейронной сети VGG-19, функция потерь в которой описывается формулой

$$l_{VGG/i,j}^{SR} = \frac{1}{W_{i,j} H_{i,j}} \sum_{x=1}^{W_{i,j}} \sum_{y=1}^{H_{i,j}} (\varphi_{i,j}(I^{HR})_{x,y} - \varphi_{i,j}(G_{\theta_G}(I^{LR}))_{x,y})^2, \quad (2)$$

где $l_{VGG/i,j}^{SR}$ – значение показателя потери;

$\varphi_{i,j}$ – функция, формирующая карту признаков после j -й свертки (после активации) до i -го слоя максимального объединения в сети VGG-19.

Предварительно выполненный вычислительный эксперимент показал, что результат использования данной функции обеспечивает более резкие контуры объектов на изображении по сравнению с результатом использования функции потерь MSE в сети *SRResNet*. Несмотря на то, что среднеквадратичная ошибка MSE обеспечивает большее значение показателей PSNR и SSIM, ее использование вносит негативный эффект – размытие изображения. Это свойство не так существенно проявляется при обработке изображений низкого пространственного разрешения, но его необходимо учитывать при работе со снимками высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, которые регистрируются при дистанционном зондировании Земли. В свою очередь, вычисление ошибки с использованием сети VGG-19 позволяет сравнивать более высокоуровневые признаки, что в большей степени соответствует особенностям зрительного восприятия деталей изображения. Выполненный эксперимент свидетельствует, что при использовании показателя потерь сети VGG-19 обеспечиваются более четкие контуры объектов при более низких значениях PSNR и SSIM по сравнению с этими показателями, полученными при применении стандартной сети *SRResNet*. Таким образом, разработка процедуры повышения детальности изображения основывается на модификации сети *SRResNet* за счет внедрения показателя потерь VGG-19.

ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Обобщенная схема работы процедуры, выполняющей повышение пространственной детальности отдельного изображения низкой детальности LR с использованием модифицированной сети *SRResNet*, представлена на рис. 1 и 2. Структура генеративно-состязательной сети включает генератор и дискриминатор, взаимодействие которых поясняется на рис. 1.

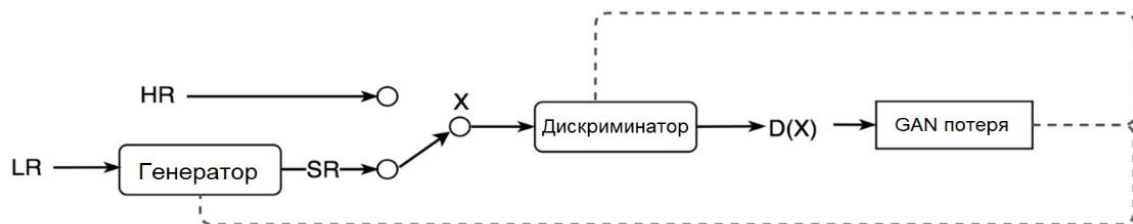


Рис. 1. Схема работы процедуры с использованием генератора и дискриминатора

Часть сети SRGAN, представленная генератором *SRResNet*, содержит несколько остаточных блоков. Каждый остаточный блок содержит два сверточных слоя « 3×3 », за сверточным слоем следует пакетная нормализация и процедура PReLU в качестве функции активации [6]. Функция, два слоя свертки субпикселей « $2x$ » используются для увеличения размера элемента. Дискриминантная сетевая часть содержит восемь сверточных слоев. По мере того как количество уровней сети увеличивается, количество функций продолжает увеличиваться, а размер функции продолжает уменьшаться. Функция активации выбирается как *LeakyReLU* и

окончательно формируется с помощью двух полностью связанных слоев и последней функции активации сигмоида.

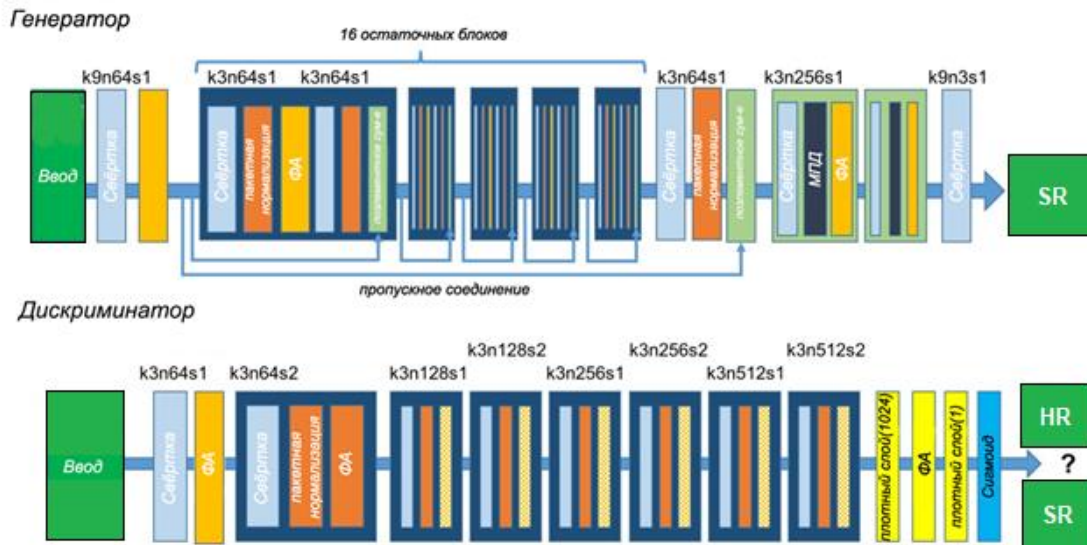


Рис. 2. Обобщенная схема сети SRGAN

В концепции генеративно-сопоставительной сети SRGAN принято, что реконструированное изображение с повышенной детальностью SR и реальное изображение с высоким разрешением HR должны быть одинаковы с точки зрения значений пикселей низкого уровня или абстрактных функций высокого уровня, а также общей концепции и стиля. Дискриминатор (рис. 1 и 2) используется для определения искусственной или естественной природы анализируемого изображения. Если дискриминатор их может различить, то изображение, созданное алгоритмом, считается поддельным, что определяется по показателю общей потери

$$l^{SR} = l_X^{SR} + 10^{-3} l_{Gen}^{SR}, \quad l_{Gen}^{SR} = \sum_{n=1}^N -\log D_{\theta_D} (G_{\theta_G} (I^{LR})). \quad (3)$$

Первая часть формулы (3) – это потеря l_X^{SR} , основанная на содержании изображения, а вторая часть – сопоставительная потеря l_{Gen}^{SR} , основанная на вероятности выхода дискриминатора – вероятности того, что реконструированное изображение SR является оригиналом. В дополнение к минимальной среднеквадратичной ошибке пространства пикселей, упомянутой выше, сопоставительная потеря на основе содержимого также включает минимальную среднеквадратическую ошибку на основе пространства признаков, которая является высокоуровневой характеристикой изображения, извлеченного сетью VGG-19.

АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА И ДИСКРИМИНАТОРА ГЕНЕРАТИВНО-СОСТАВИТЕЛЬНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Качество повышения детальности изображения с использованием исследуемого класса искусственных нейронных сетей определяется качеством обучения входящих в их структуру генератора и дискриминатора. Схемы алгоритмов обучения генератора и дискриминатора представлены на рис. 3 и 4.

В качестве исходных данных для обучения генератора используются соответствующие друг другу изображения низкой детальности LR и изображения высокого пространственного

разрешения HR (рис. 3). К исходным изображениям применяется операция свертки – пространственной фильтрации. Результат свертки подается на функцию активации нейрона, которая формирует выходной сигнал, определяемый входным сигналом или набором входных сигналов. Далее сформированные нейроны подаются на вход процесса обучения.

Начало процесса обучения нейронной сети представляет собой предъявление сети выборки обучающих примеров. Каждый образец подается на входы сети, затем проходит обработку внутри структуры сети. Вычисляется выходной сигнал сети, который сравнивается с соответствующим значением целевого вектора, представляющего собой требуемый выход сети.

После обучения производится свертка изображения с последующей пакетной нормализацией, направленной на повышение производительности и стабилизацию работы искусственных нейронных сетей. Суть пакетной нормализации заключается в том, что некоторым слоям нейронной сети на вход подаются данные, предварительно обработанные и имеющие нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию.

Далее последовательно с заданными параметрами применяются функция активации, свертка изображения и пакетная нормализация. Полученный промежуточный результат подвергается поэлементному суммированию. Сумматор агрегирует все входные сигналы в одно число – взвешенную сумму, которая характеризует поступивший на нейрон сигнал в целом. Получаемую взвешенную сумму можно интерпретировать как степень общего возбуждения нейрона.

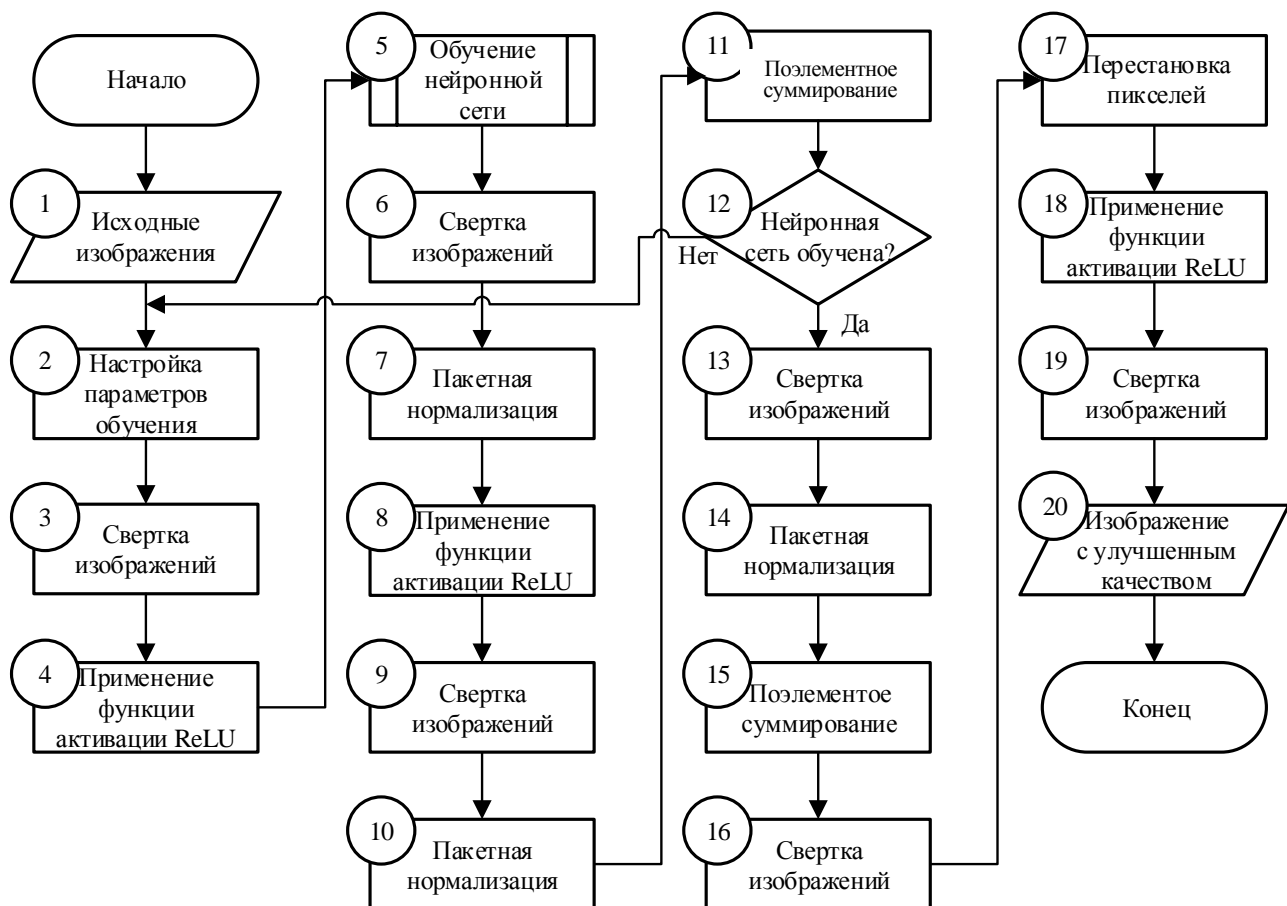


Рис. 3. Схема обучения генератора

Очередные шаги выполняют свертку изображения и перестановку пикселей, которая основана на свертке субпикселей. В частности, производится перестановка элементов в тензорной форме. К результату перестановки применяется функция активации – «Сигмоид»,

сущность работы которой состоит в том, что в качестве прогнозируемого значения выбирается выход с наибольшим значением (наибольшей вероятностью). Заключительная операция включает свертку изображения, в результате которой непосредственно из тензора выполняется генерация изображения высокой детальности SR. Описанный цикл процесса обучения повторяется каждую итерацию.

Следует отметить, что, собственно, для решения задачи повышения детальности изображения используется обученная нейронная сеть. В таком случае для обработки исходных изображений низкой детальности LR используются шаги 13–19, содержащие настроенные процедуры (рис. 3).

Алгоритм дискриминатора в качестве исходных данных использует изображения с повышенной детальностью SR, созданные генератором, и изображения высокого разрешения HR из набора данных для обучения (см. рис. 1). К ним применяются операция свертки и функция активации, аналогичные процедурам в составе генератора. Далее начинается процесс обучения дискриминатора. После этапа обучения последовательно применяются операции свертки изображения, использования функции активации и пакетной нормализации.

На следующем шаге формируется многосвязанный плотный слой, который посредством функции активации «Софтмакс» трансформируется в односвязанный плотный слой. К нему применяется функция активации «Сигмоида».

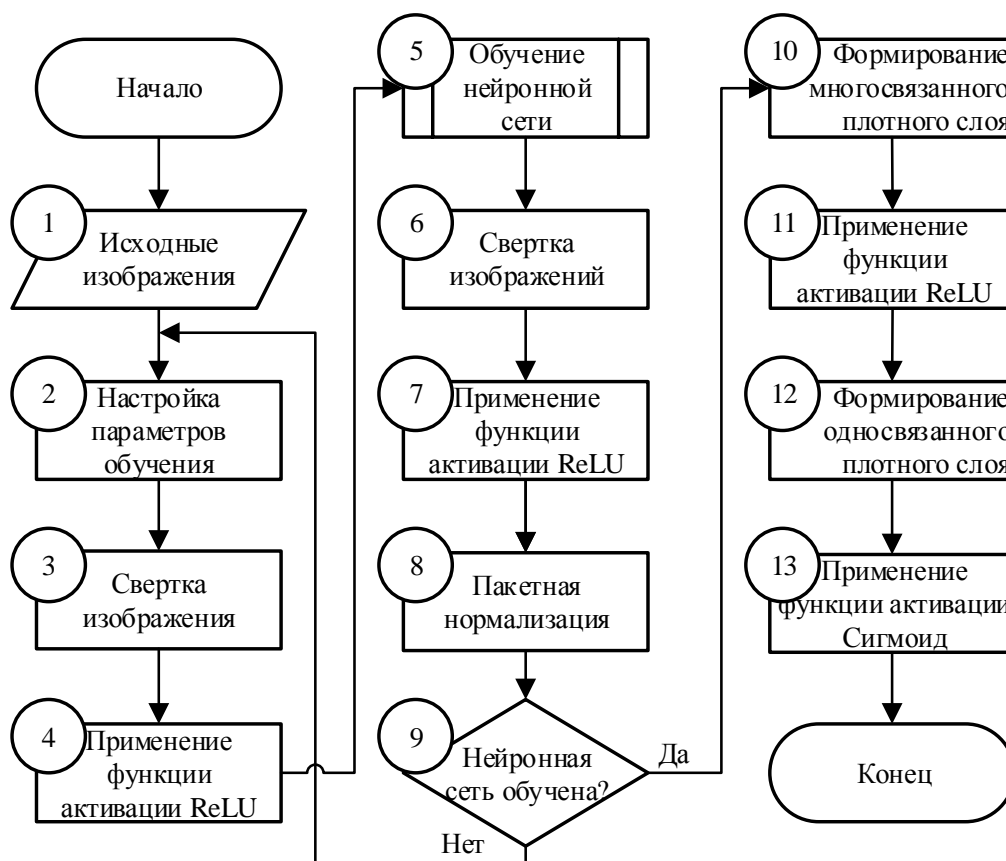


Рис. 4. Схема обучения дискриминатора

Результатом применения функции активации является значение вероятности, которая характеризует подлинность созданного генератором изображения SR. Таким образом, в результате работы дискриминатора формируется оценка подлинности изображения, созданного генератором.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА

Программная реализация разработанной процедуры выполнена с использованием библиотек *OpenCV*, *Keras*, *Tensorflow* и языка программирования *Python*. Основное содержание эксперимента посвящено исследованию влияния функции потерь с использованием предварительно нейронной сети VGG-19, обеспечивающей выявление более высокоуровневых признаков скрытого пространства изображения. В настоящей работе функция потери на основе сети VGG-19 является основным фактором, который обеспечивает более точное обучение нейронной сети, используемой для повышения пространственной детальности изображения. При этом ключевая подзадача повышения детальности состоит в достижении требуемого качества выходного результата, под которым понимается качество зрительного восприятия реконструированного изображения. Улучшение качества снимка при решении задачи повышения детальности по сравнению с существующим алгоритмом проявляется в устранении размытия резких контуров объектов. Примеры результатов обработки по повышению детальности реальных изображений, полученных средствами дистанционного зондирования Земли, представлены на рис. 5.

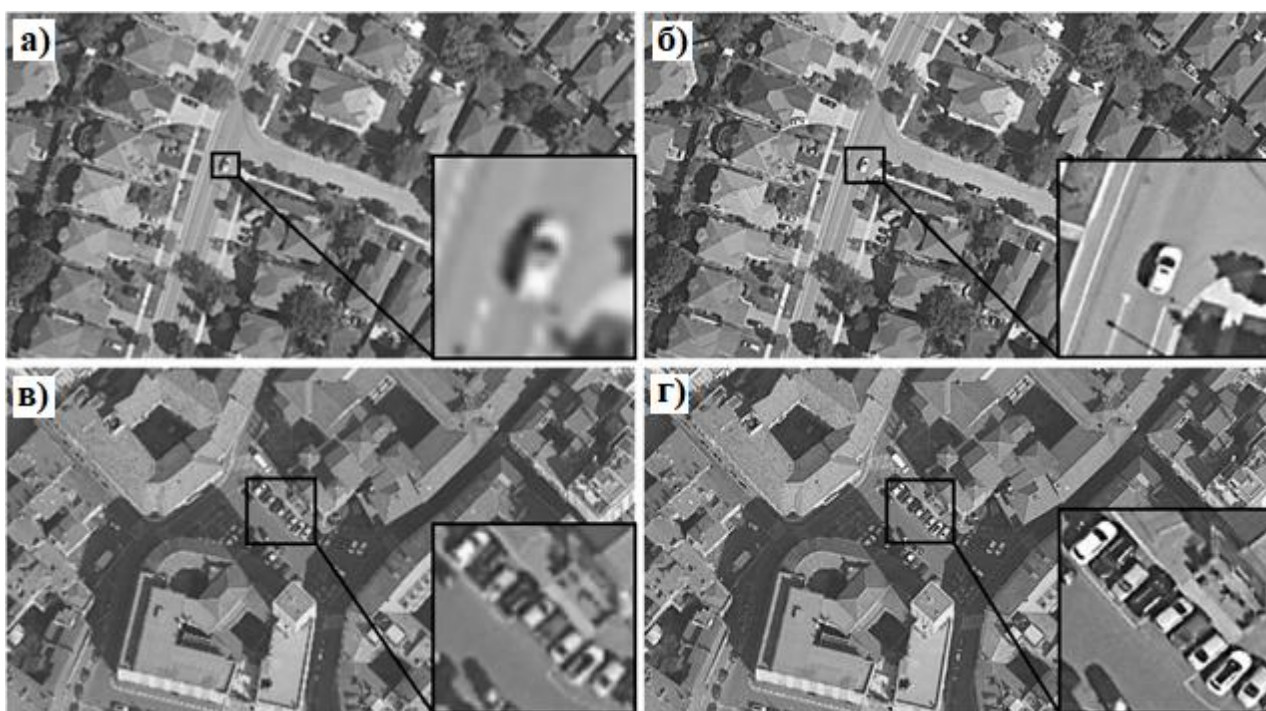


Рис. 5. Результаты работы нейронной сети по повышению пространственной детальности:

а, в – исходные изображения; б, г – изображения с повышенной детальностью, результат обработки с использованием модифицированной сети SRGAN

Разработанная процедура протестирована на различных реальных изображениях и показывает результаты, подтверждающие ее работоспособность. При тестировании на изображениях получены оценки средних значений показателей: $PSNR = 25$ дБ и $SSIM = 0,73$ (рис. 6).

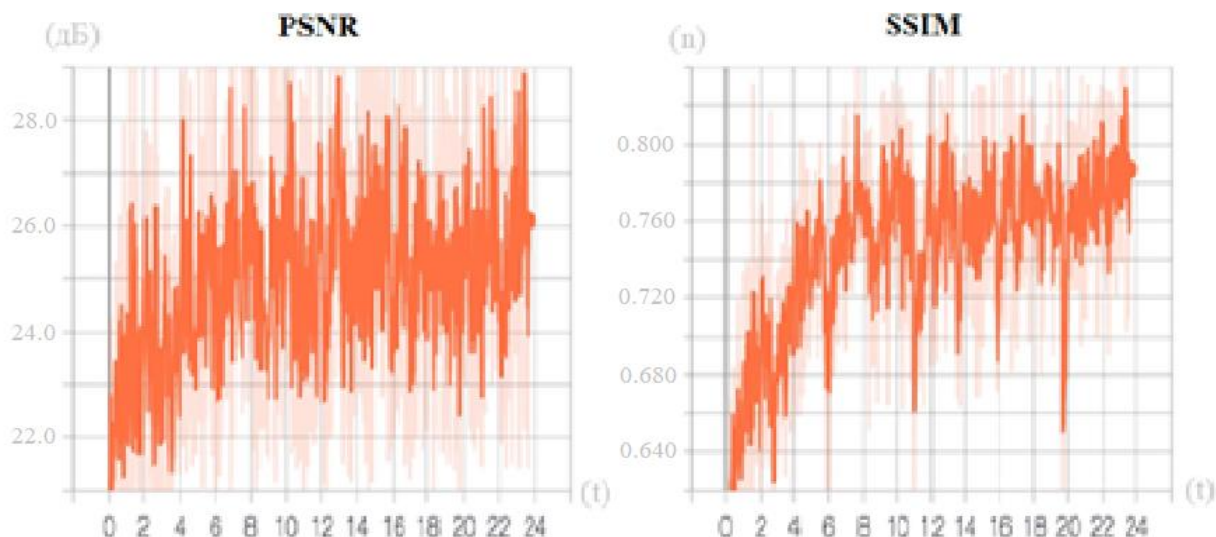


Рис. 6. Зависимости значений PSNR и SSIM от количества эпох при обучении модели сети

Отмечается, что стандартная сеть *SRResNet* по данным показателям имеет более высокие значения. При этом выполненный визуальный анализ подтверждает, что разработанная процедура, модифицированная с использованием сети VGG-19, обеспечивает получение результата с более высоким визуальным качеством. Кроме того, при исследовании предложенной процедуры выявлено, что использование такого подхода при обучении модели дает существенный прирост вычислительной производительности, приблизительно на 29%. Предложенный подход к модификации генеративно-состязательной сети SRGAN, объединяющей генератор – нейронную сеть *SRResNet* и дискриминатор, улучшает результаты решения задачи повышения детальности изображения по эвристической оценке визуального качества и по показателю вычислительной ресурсоемкости.

Таким образом, выполненное исследование показало, что путем использования функции потерь сети VGG-19 по показателям PSNR и SSIM были получены значимые для практики результаты в случае решения задачи повышения пространственной детальности снимков, характерных для области дистанционного зондирования Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований определены негативные факторы, проявляющиеся при решении задачи повышения пространственной детальности изображения с использованием нейронной сети. На основе анализа сети *SRResNet* предложена ее модернизация путем добавления дискриминатора с использованием функции потерь обученной модели нейронной сети VGG-19. Выполнена практическая отработка этапов предложенного подхода на реальных изображениях. Рассмотрены особенности подбора данных, обучения генеративно-состязательной нейронной сети и внедрения функции потерь в процесс обучения. Эксперимент, выполненный с использованием собственной программной реализации, подтвердил работоспособность процедуры повышения пространственной детальности изображения с более высоким качеством в отношении визуальных свойств изображения и быстродействия системы обработки. В дальнейших исследованиях предполагаются решение задачи по улучшению быстродействия процедуры обработки и анализ ее применимости для более высоких коэффициентов увеличения пространственной детальности.

Список используемых источников

1. *Binieli M.* Root mean square error (MSE). – 2021. – 12 p.
2. *Григорьев А. Н., Дудин Е. А.* Метод сокращения избыточности данных оптико-электронного дистанционного зондирования Земли на основе реструктуризации полутоновых изображений // *Оптический журнал.* – 2018. – Т. 85, № 10. – С. 26–32.
3. *Hore A., Ziou D.* Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM // *IEEE Conference.* – 2010. – P. 5.
4. Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network / *C. Ledig [et al.]* // *Computer Vision and Pattern Recognition.* – 2017. – P. 10.
5. *Simonyan K., Zisserman A.* Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition // *Computer Vision and Pattern Recognition.* – 2015. – P. 12.
6. Activation Functions: Comparison of Trends in Practice and Research for Deep Learning / *C. Nwankpa [et al.]* // *Machine Learning.* – 2018. – P. 20.

С. А. Давыдов;
Р. А. Заблоцкий;
А. С. Тимошук,
кандидат технических наук

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ОЗОнового СЛОЯ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ

В статье приводятся результаты анализа состояния озонового слоя и причин его разрушения в Арктическом регионе в различные периоды года. Авторами предлагается использование космических спутниковых средств дистанционного зондирования Земли для исследования климатических особенностей состояния озонового слоя. Даются рекомендации по интерпретации спутниковых озонметрических данных и их применению для защиты людей в опасные периоды снижения уровня озонового слоя в Арктическом регионе.

Ключевые слова: озоновый слой, метеорологические спутники, ультрафиолетовое излучение, контроль, Арктический регион.

ВВЕДЕНИЕ

Арктический регион в настоящее время является критически важным для обороны страны, экономики, политики, что обуславливает необходимость расширения присутствия Российской Федерации в Арктике. Но расширение этого присутствия в условиях сурового климата Арктики требует повышенных мер безопасности и учета особенностей региона в целях сохранения здоровья людей. Одной из таких особенностей является состояние озонового слоя (ОС), учет которого в этом регионе по рассматриваемым ниже причинам крайне необходим, например: для планирования времени работы на открытом воздухе, проведения ротационных мероприятий, выбора защитной одежды и экипировки. В результате выполненных к настоящему времени исследований установлено, что основными климатическими и экологическими аспектами, связанными с разрушением ОС, являются следующие [1, 2].

1. Озон, поглощая жесткое ультрафиолетовое излучение в диапазоне длин волн 0,28–0,32 мкм, защищает жизнь на Земле.

2. Озон, поглощая некоторую часть инфракрасного излучения Земли, задерживает около 20% ее излучения и тем самым вносит свой вклад в тепляющее действие атмосферы (парниковый эффект) и изменение климата.

3. В нижних слоях атмосферы при определенных неблагоприятных условиях (наличие слоя инверсии, большая концентрация загрязняющих веществ, возникающая вследствие выбросов автомобильного транспорта, и др.) наличие озона может стать основной причиной образования смога в крупных городах, что приводит к сильному токсичному воздействию на живые организмы и прежде всего на человека.

4. Заметное снижение содержания озона может привести к существенному увеличению числа раковых заболеваний кожи (на 2,6% из расчета на каждый процент снижения содержания озона) и может вызвать до 150 тысяч дополнительных случаев слепоты из-за катаракты. При этом значительно возрастает число болезней, вызванных ослаблением иммунной системы человека (табл. 1).

5. Существенное снижение содержания озона приводит к образованию так называемых «озонных дыр» (табл. 2).

Таблица 1

Влияние озонового слоя на УФ-излучение

УФ-излучение	УФ-А	УФ-В	УФ-С
1–400 нм	315–400 нм Характеризуется слабым биологическим воздействием на организм человека	280–315 нм Сильно воздействует на кожный покров и обладает противорахимным действием (наиболее эффективно излучение с длиной волн 297 нм)	1–280 нм Отрицательно воздействует на тканевые белки и липоиды, сетчатку глаза, разрушает кровяные тельца, вызывает мутацию молекул ДНК

6. Как химическое соединение озон является сильнейшим окислителем, способным при непосредственном контакте отравить флору и фауну, которые он защищает в качестве стратосферного озонового слоя.

7. Озон является эффективным парниковым газом.

8. Поскольку озон регулирует жесткость космического излучения, то вследствие его уничтожения (или серьезного уменьшения его содержания) жесткость излучения резко возрастет, а следовательно, произойдут реальные изменения в состоянии растительного и животного миров.

Таблица 2

Характеристики озоновых дыр

Определение «озоновых дыр»	Площади	Время существования	Основные причины, обуславливающие образование «озоновых дыр»
Область озоносферы с концентрацией озона до 50%	От тысяч до млн. км ²	От нескольких дней до недели	Высокие концентрации хлорных соединений; низкие температуры в стратосфере; наличие аэрозольных облаков; наличие окислов азота; наличие фреонов и др.

ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ
АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА

В 1974 году, химики Франк Шервуд Роуленд и Марио Молина, изучавшие циркуляцию в атмосфере хлорфторуглеродов (ХФУ), выдвинули гипотезу о том, что эти соединения способны разрушать озоновый слой. Точнее, они предположили, что озон уничтожается хлором, выделяющимся при распаде ХФУ. На эту тему они опубликовали статью на две страницы в журнале *Nature*. В 1985 году британские ученые обнаружили значительное истощение озонового слоя над Антарктидой площадью 1 000 км² (сейчас размеры «дыры» могут превышать 20 000 000 км².)

Если к концу 1990-х годов разрушение озонового слоя составляло порядка 10%, то сейчас по современным прогностическим моделям при условии выполнения климатических согла-

шений озоновый слой будет восстанавливаться со скоростью 1–3% в течение 10 лет и при таких темпах должен полностью восстановиться над Северным полушарием к 2030-м годам, над Южным полушарием – к 2050-м и над полюсами – к 2060-му году (рис. 1).

Помимо защитных экологических функций озон имеет и климатообразующее значение, особенно в районах полюсов, которые играют роль «фабрик погоды». Если в 2000-х годах говорили только о проблемах с озоновым слоем в Антарктике, то в 2020 году в небе над Арктикой образовалась огромная «озоновая дыра» – вероятно, самая большая на Севере за всю его историю (рис. 2).

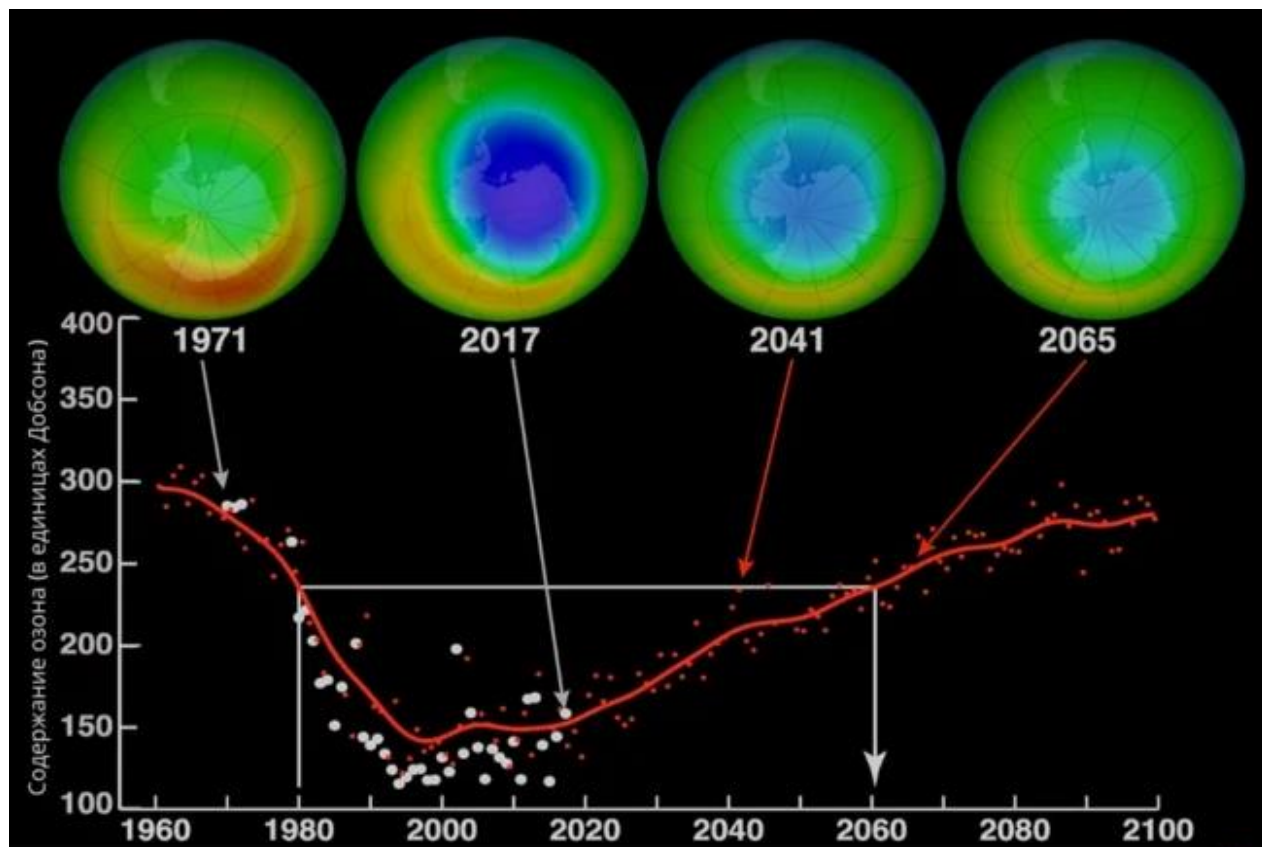


Рис.1. Динамика и прогноз состояния озонового слоя до 2100 года

Исходя из вышеизложенного представляется важным рассмотрение известных к настоящему времени причин разрушения атмосферного озона. Они включают в себя:

1. Воздействие на атмосферный озон окислами азота.

Окислы азота NO_x образуют каталитический цикл, приводящий к разрушению озона (O_3):



Одна молекула NO вызывает рекомбинацию десятков, сотен молекул O_3 .

Возникает вопрос: откуда берутся в атмосфере NO_x ?

1. Прежде всего, источник NO_x в стратосфере – перенос от земной поверхности закиси азота N_2O , образующейся в ходе естественного процесса разложения бактериями азотных веществ.

2. При контакте воздуха с очень горячими поверхностями летательных аппаратов (самолетов, ракет)



3. При сгорании топлива в двигателях реактивных самолетов.

4. При сгорании угля (8 кг угля дает при сгорании в среднем 10 г NO_x).

II. Возможное применение стратосферных самолетов для целенаправленного уничтожения атмосферного озона. При сгорании топлива выделяются окислы азота, которые образуют азотный цикл.

Общая оценка газовых выбросов приведена в табл. 3.

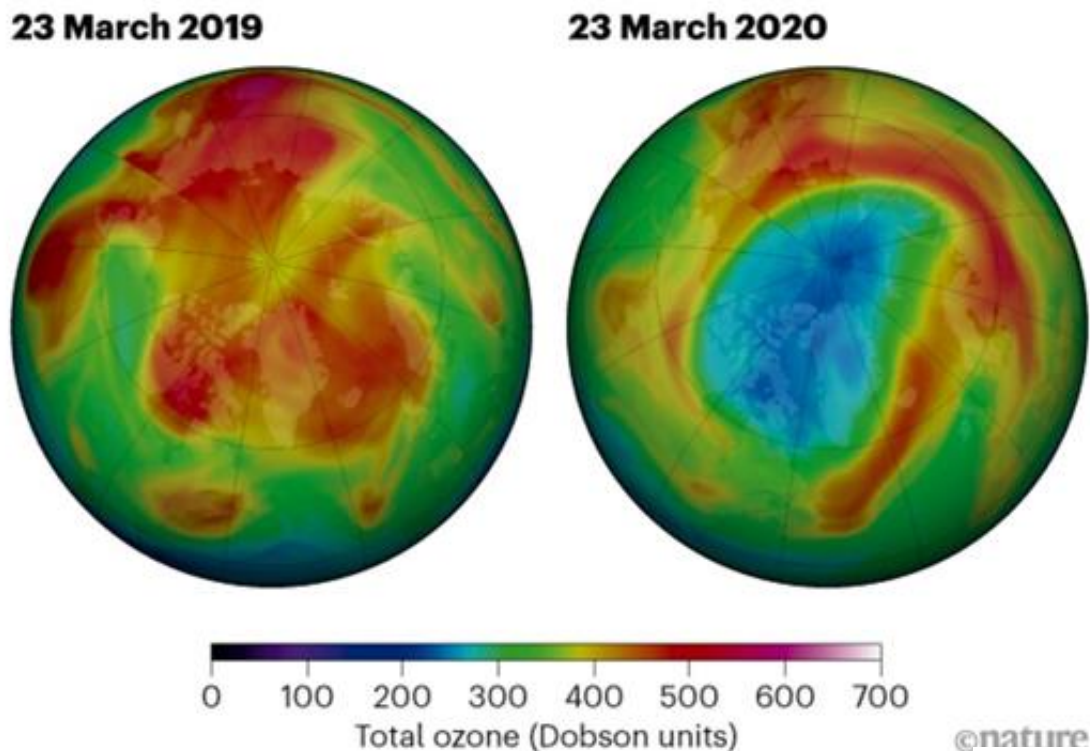


Рис.2. «Озоновая дыра» над Арктикой в марте 2020 года

Таблица 3

Количественные характеристики газовых выбросов стратосферных самолетов различных типов

Тип самолета	W , кг/ч	E , г						
		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	CH ₄	CO	NO ₂	C
Конкорд	5220	3100	1300	1,0	0,2	3,5	18	0,1
AST	2200	3100	1300	1,0	0,2	3,5	21	0,1
Ту-144	2500	3100	1300	1,0	0,2	3,5	18	0,1
В-747	2500	3100	1300	2,0	0,12	4,0	15	0,1

Современные оценки показали, что для уменьшения общего содержания озона на 10% необходимо, чтобы выброс NO_x из двигателей достиг значения 1-2 млн. тонн в год при высоте полета 20 км или 3–5 млн. тонн в год при высоте полета 17-18 км.

Расчеты показали, что искусственное образование окислов NO_x при использовании воздушного флота из 500 самолетов всего на один порядок меньше содержания этих компонентов в атмосфере.

При эксплуатации самолетов AST выбросы NO_x будут равны его природному содержанию в атмосфере, что может привести к изменению общего содержания озона.

III. Возможный способ воздействия на озоновый слой – внесение в атмосферу хлорфторуглеродов или хлорфторметанов.

Инертность указанных соединений делает эти газы опасными для озона. Это означает, что при выбросе этих газов у поверхности Земли они могут достигнуть стратосферы, пройдя тропосферу. При достижении высот 25 км ультрафиолет разрушает устойчивые в обычных условиях молекулы хлорфторуглеродов, которые распадаются на компоненты, обладающие высокой реакционной способностью (рис. 3).

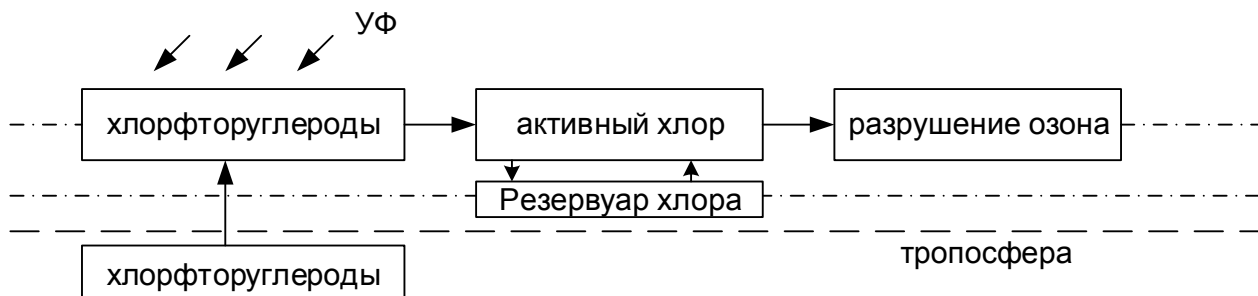
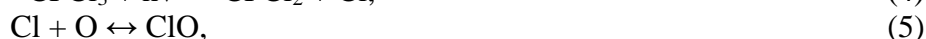


Рис. 3. Схема разрушения хлорфторуглеродами озона

Сущность этого воздействия заключается в том, что хлор (Cl) сдвигает равновесие в процессах образования озона в сторону его уменьшения. Хлор действует подобно катализатору. Его количество в процессе взаимодействия с озоном не уменьшается, вследствие чего одна молекула хлора может разрушить до 100 тысяч молекул озона:



Важным резервуаром хлора являются нитрат хлора



и соляная кислота



В конце концов, каждая молекула резервуара поглощает фотон или вступает в реакцию с какой-нибудь другой молекулой, в результате чего она распадается, высвобождая Cl.

Наряду с хлором, бром (Br) и его окиси (например, BrO) также могут эффективно разрушать озон. Разрушение озона может происходить под действием и других химических реакций.

IV. Еще один способ разрушения озона – проведение высотных ядерных взрывов. При таких взрывах образуется 1–10 кт NO_x , при этом озон разрушается под действием мощного излучения взрыва.

V. Разрушение озона в локальном масштабе в результате запуска ракет-носителей.

Например, при запуске ракеты-носитель «Сатурн-5» образовалась область с пониженной концентрацией озона. Подсчитано, что к значительному снижению концентрации озонового слоя Земли может привести запуск 125 ракет-носителей этого типа.

СПУТНИКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ОЗОнового СЛОЯ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

На сегодняшний день решение проблемы геофизического обеспечения объектов Министерства обороны РФ в высокоширотных и полярных районах предполагает проведение постоянного мониторинга погодных-климатических условий, тенденции к изменению которых отчетливо проявляются в арктической зоне РФ. В связи с обширностью арктических терри-

торий, отсутствием полномасштабной наземной озонметрической сети в данном регионе, особенно актуальной для наблюдений за состоянием озонового слоя является задача использования для этих целей спутниковой метеорологической группировки.

Основу наземного сегмента космической системы наблюдения Росгидромета составляет Государственная территориально-распределительная система космического мониторинга (ГСКМ), которая позволяет обеспечить полное покрытие всей территории России и ближнего зарубежья космической съемкой в режиме реального времени. ГСКМ обеспечивает прием информации с 11 и 24 (зарубежных) спутниковых наблюдений Земли.

Сейчас российская орбитальная группировка дистанционного зондирования Земли состоит из космических аппаратов серий «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М», «Электро-Л» и «Арктика-М». Космические аппараты дают возможность ежедневно получать информацию об озоне в глобальном масштабе в виде поля ОСО. Основная роль в космическом мониторинге озона принадлежит спектрофотометрам TOMS (спутники *NIMBUS-7*, «Метеор-3», *EARTH PROBE*) и OMI (спутник *AURA*), осуществляющим надирные измерения уходящего УФ-излучения в течение суток. С их помощью получен длительный ряд (примерно за 31 год) ежедневных глобальных измерений озона в нижней стратосфере с небольшим временным перерывом (~20 месяцев). Для получения оперативных спутниковых озонметрических данных в основном используются два космических аппарата *AURA* и *Suomi-NPP*, функционирующие на солнечно-синхронной орбите.

Для оперативного контроля состояния озонового слоя по спутниковым данным ДЗЗ одним из удобных способов является использование базы данных европейской службы атмосферного мониторинга *CAMS Copernic service* (<https://www.copernicus.eu/en>) по следующему алгоритму:

1. Подключение к базе данных проекта «Коперник». Для проведения анализа состояния озонового слоя применить данные из базы *Ozone layer*.
2. Выбор времени, даты и определенной территории.

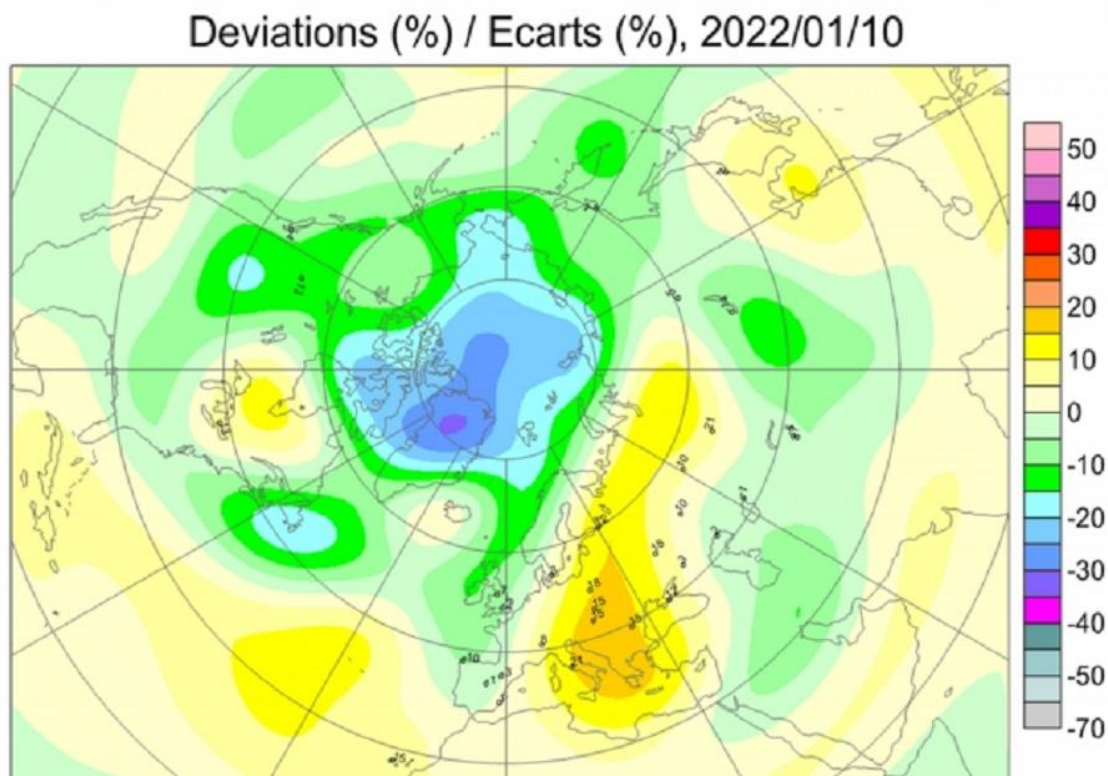


Рис. 4. Карта состояния озонового слоя за 10 января 2022 года

3. Получение данных по состоянию озонового слоя на выбранную дату, время и область (Арктика).

4. Оценивание состояния озонового слоя по цветовой шкале. Например, голубой цвет на озонометрической карте за 10 января (рис. 4) и 10 марта (рис. 5) 2022 года означает, что на данный период концентрация озона находилась ниже опасного для человека уровня в 350 DU (добсонов) на большей части Арктики. На этом основании делаем вывод о необходимости выполнения защитных мероприятий.

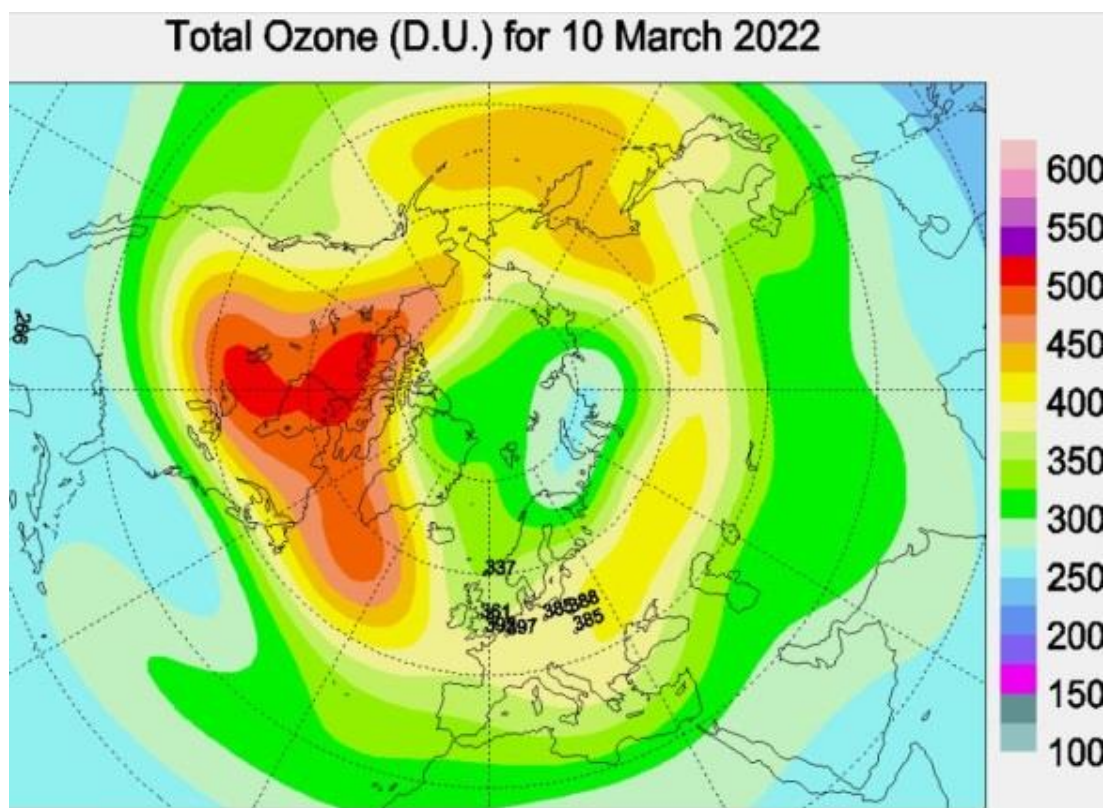


Рис.5. Карта состояния озонового слоя за 10 марта 2022 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с тем, что в Арктическом регионе в зимний и весенний периоды года систематически наблюдаются крайне низкие значения озонового слоя (ОС), обусловленные в первую очередь факторами «полярной ночи» и дефицитом солнечной радиации, необходимой для процесса образования озона, с целью защиты здоровья человека в эти опасные периоды (особенно весной) рекомендуется:

1. Включить в систему циркуляции геофизической информации Гидрометеорологической службы (ГМС) ВС РФ данные по состоянию ОС.
2. Использовать средства защиты от ультрафиолетового излучения (закрытая одежда и специальные кремы от загара с числом «SPF» больше 10).
3. Для защиты глаз от вредного воздействия ультрафиолетового излучения использовать специальные защитные очки, задерживающие до 100% ультрафиолетового излучения.
4. Минимизировать нахождение человека под прямыми солнечными лучами.

Список используемых источников

1. *Доронин А. П.* Воздействия на атмосферные процессы и явления. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 292 с.
2. *Качурин Л. Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 462 с.

Д. А. Денисенков*,

кандидат физико-математических наук;

В. Ю. Жуков*,

доктор физико-математических наук;

Г. Г. Щукин***

доктор физико-математических наук, профессор

*Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

**Муромский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ОТРАЖЕНИЙ ОТ МЕТЕООБРАЗОВАНИЙ

В статье ведется полемика с исследователями, полагающими, что закон распределения отражений от метеорообразований не является нормальным, и обосновывающим свою позицию с помощью различных опубликованных в печати данных. Рассматриваются особенности получения подобного рода экспериментальных данных, после чего делается вывод о предпочтительном использовании результатов собственных экспериментов, детали которых хорошо известны. Представляются результаты экспериментальных исследований авторов на базе метеорологического радиолокатора МРЛ-5. Описываются применяемые в них технические средства и методики. Делается вывод о том, что в наблюдавшихся авторами обложных осадках в виде дождя и снега распределение амплитуды создаваемых ими отражений близко к релейскому, что говорит о нормальном распределении самого сигнала.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, закон распределения амплитуды сигнала, дистанционное зондирование атмосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные отражения от метеорологических целей являются суммой большого количества сигналов от элементарных отражателей. Согласно центральной предельной теореме теории вероятности, распределение этой суммы должно быть нормальным. Системы обработки сигнала в метеорологической радиолокации основываются именно на этом предположении. Однако существуют как сторонники [1, 2], так и противники подобной точки зрения [3, 4].

Например, в последней из приведенных статей предполагается существование совершенно других законов распределения рассматриваемых случайных величин. Не будем касаться непонятно откуда взятых авторами предположений о логго-нормальном и «логго-гаммофункциональном» законах распределения принимаемых метеорологическим радиолокатором сигналов, а также того, что асимметрия релейского процесса, прошедшего через логарифмический приемник, ошибочно считается отрицательной. Остановимся на том факте, что свои предположения они строят на данных других авторов, полученных в результате обработки процессов на выходе «линейно-логарифмического детектора». Скорее всего, под последним следует понимать логарифмический усилитель с линейным детектором на выходе.

Во-первых, делать какие-либо выводы о законе распределения входного процесса на основе того, что остается от него после двух нелинейных преобразований – логарифмирования при усилении и ограничения при детектировании, подобно гаданию на кофейной гуще. Тем более что зависимость $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{вх}}$ в реальных логарифмических приемниках далека от идеальной логарифмической, так же как и реальные детекторы не обеспечивают идеального ограничения и линейности характеристики. Следовательно, и применение к решению рас-

смаатриваемой задачи имеющихся теоретических выкладок, основанных как раз на «идеальной логарифмичности» усилителя и линейности характеристики детектора, по крайней мере, некорректно. Конечно, лучше всего было бы анализировать непосредственно входной сигнал и проверять близость его распределения к нормальному. Однако для этого необходимо иметь когерентный радиолокатор, которого в распоряжении авторов нет. Приходится довольствоваться некогерентным радиолокатором, а значит, исследовать не сам сигнал, а его амплитуду на предмет соответствия распределению Релея.

Во-вторых, как показал опыт авторов данной статьи, использовать чужой материал необходимо с большой осторожностью, ибо существует множество «подводных камней», способных внести совершенно непредвиденные искажения в получаемые результаты и неучтенных предыдущими исследователями. Частично данный вопрос уже рассматривался авторами [2]. Позволим себе кратко напомнить основные выводы:

1. Усилитель должен быть линейным.
2. Динамический диапазон усилителя должен быть не менее 30 дБ. Оба требования обеспечивают неискаженную передачу сигналов.
3. Должно контролироваться отсутствие ограничений сигнала как «сверху», так и «снизу», т. е. уровень сигнала надо строго согласовывать с характеристиками усилителя.
4. Детектирование должно проводиться только цифровым методом, так как характеристика реального диода начинается не от начала координат и имеет на начальном участке форму параболы. Это приводит к пропаданию нулевых и близких к ним значений выходного сигнала, а также к искажению закона распределения.
5. Частота дискретизации при аналого-цифровом преобразовании должна более чем на порядок превышать величину τ^{-1} , где τ – длительность зондирующего импульса. Это обеспечивает отсутствие «дрожания» строка по дальности и, следовательно, предотвращает возможность существования в одном сигнале отражений от двух элементов разрешения и, соответственно, смещения двух законов распределения. Упомянем также о том, что она должна превышать значение промежуточной частоты приемника.

Кроме перечисленных авторами в процессе дальнейшей работы в рассматриваемом направлении было сформулировано дополнительное требование.

6. Регистрацию данных следует проводить на дальностях, превышающих 30 км, на которых гарантированно отсутствуют отражения от местных предметов. При наблюдении осадков рассмотреть наличие «местника» невозможно. Даже если в отсутствие осадков в данной точке не фиксировалось никаких отражений, то это еще не гарантирует их появления при дожде. Например, малый уровень отражений, имевший место в сухую погоду, может значительно увеличиться при покрытии объекта, его создающего, пленкой воды. Даже при работе на больших углах места на малых дальностях радиолокатор может «поймать» мешающие отражения боковыми лепестками диаграммы направленности. В результате в сигнале появляется постоянная составляющая, что ведет к его распределению по обобщенному закону Релея, форма которого по мере увеличения постоянной составляющей все больше приближается к нормальному закону. Пример такого сигнала, полученного на дальности 5 км, и распределение его амплитуд приведены на рис. 1.

Следует обратить внимание на появление в сигнале (рис. 1,а) очевидной периодичности колебаний амплитуды с частотой примерно 60 периодов зондирования или 4 Гц. Самое первое предположение – это какая-то внутренняя наводка или внешняя помеха. Но во многих других элементах разрешения подобные флуктуации не наблюдались. Зато они имели место на малых дальностях при повороте антенны по азимуту. При этом каждый раз оценка закона распределения амплитуды сигналов больше была похожа на обобщенное релейское распределение, а частота флуктуаций изменялась. Единственное объяснение данному явлению – это биения отражений от неподвижного местного объекта и движущихся гидрометеоров. Изменение частоты вызывается изменением угла между направлением антенны и вектором

перемещения частиц. Данный факт может служить предиктором того, что сигнал метеоцели «засорен» помехой от местного предмета.

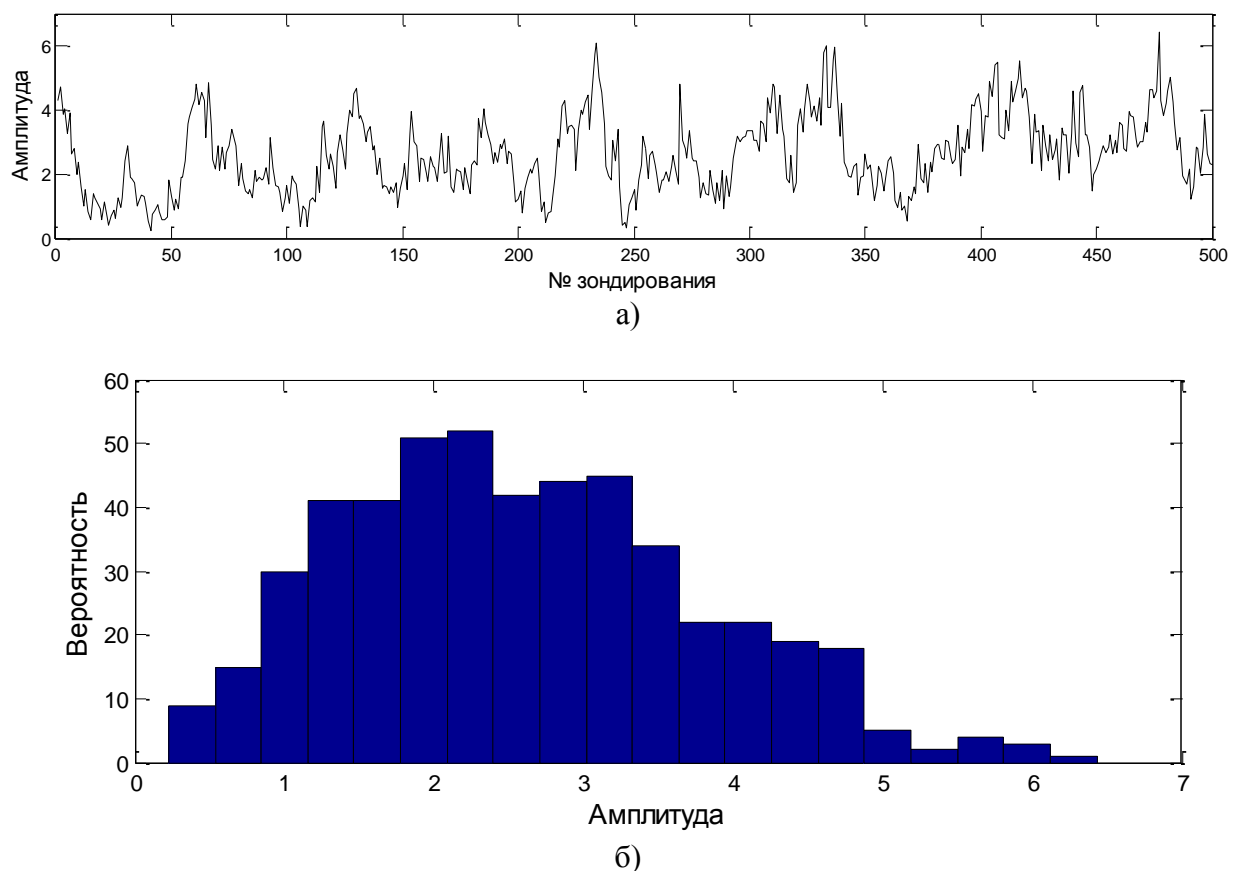


Рис. 1. Пример реализации амплитуды сигнала при отражении сигнала от жидких осадков, находящихся на дальности 5 км, для канала с длиной волны $\lambda=3$ см (а) и гистограмма его распределения (б)

Из сказанного выше следует, что только строгое выполнение всех перечисленных требований к аппаратуре, задействованной в исследовании, обеспечивает получение корректных данных. Выполнялись ли они в описываемых другими авторами экспериментах, неизвестно. Поэтому естественно желание самим проверить выдвигаемые гипотезы, тем более что рассматриваемая задача имеет важное научное и практическое значение [5].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В распоряжении авторов имелся метеорологический радиолокатор МРЛ-5. Некогерентный и включающий два канала с длиной волны несущего колебания 3 и 10 см. Структурная схема усилителя данного радиолокатора представлена на рис. 2.

Как следует из данной схемы, в нем имеется линейный канал, задействованный в системе автоматической регулировки усиления. Естественно, что первой возникшей идеей было воспользоваться именно им. Однако попытки ее реализации потерпели крах вследствие двух причин:

- во-первых, из-за малого динамического диапазона усилителя;
- во-вторых, из-за очень большой постоянной времени выходного детектора, превышавшей в несколько раз период следования зондирующих импульсов.

Пример распределения сигнала, получаемого на его выходе, можно видеть на рис. 3.

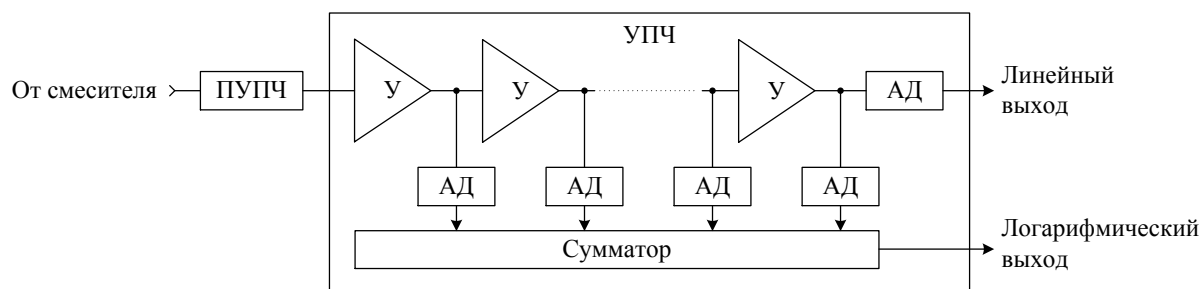


Рис. 2. Структурная схема приемника радиолокатора МРЛ-5, где ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты; У – усилительный каскад; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; АД – амплитудный детектор

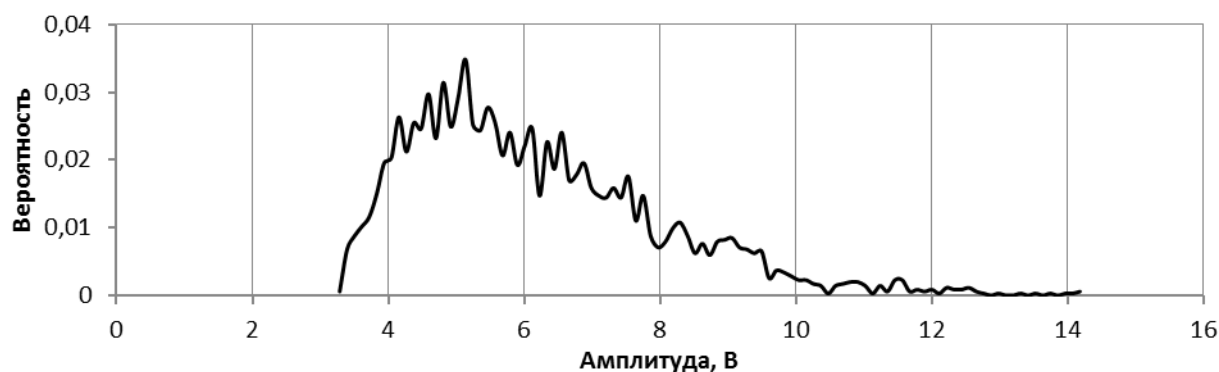


Рис. 3. Пример распределения сигнала на выходе амплитудного детектора линейного выхода приемника МРЛ-5 при отражении сигнала от жидких осадков

Попытка задействовать логарифмический выход, но только при условии достаточно малого сигнала, не выходящего за пределы начального участка, на котором работает только первый каскад усиления и, следовательно, обеспечивается линейность характеристики, также не удалась. Главным образом из-за детектора, который хоть и имел гораздо меньшую постоянную времени, чем у ранее рассмотренного, но все равно приводил к искажениям искомого распределения вроде тех, что представлены на рис.3.

В итоге была реализована схема получения экспериментальных данных, показанная на рис. 4.

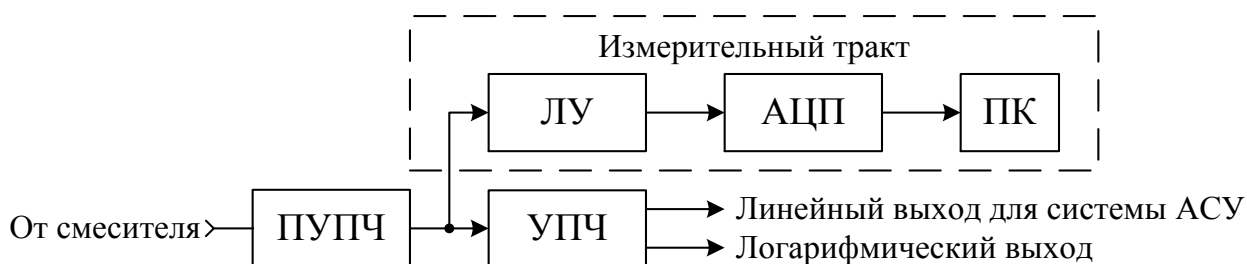


Рис. 4. Структурная схема измерительного тракта для оценки закона распределения амплитуды отражений от метеоцели для радиолокатора МРЛ-5, где ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты; ЛУ – линейный усилитель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – компьютер

К выходу предварительного усилителя промежуточной частоты (равной 30 МГц) подключался линейный усилитель с достаточным динамическим диапазоном и большим входным сопротивлением, гарантирующим минимальное воздействие на штатные режимы работы радиолокатора. Далее сигнал поступал на 12-разрядный АЦП с тактовой частотой 80 МГц, после чего данные попадали в компьютер, где реализовывалось его идеальное линейное детектирование. Для этого сначала сигнал смещался в область нулевых частот путем перемножения поступающих данных на $\text{Sin}\omega_{\text{пр}}$ и $\text{Cos}\omega_{\text{пр}}$, где $\omega_{\text{пр}}$ – промежуточная частота приемника, равная 30 МГц, и осуществлялось последующее осреднение по временному интервалу 1 мкс, т. е. длительности излучаемого импульса. Таким образом, выделялись низкочастотные компоненты двух получаемых в результате указанного перемножения квадратур. Далее вычислялся модуль сигнала в каждый момент времени в соответствии с формулой

$$S_i = \sqrt{S_{\text{sin}i}^2 + S_{\text{cos}i}^2},$$

где S_i – мгновенное значение амплитуды протектированного сигнала;
 $S_{\text{sin}i}, S_{\text{cos}i}$ – синусная и косинусная компоненты сигнала, полученные после фильтрации.

И наконец, строилась гистограмма распределения получаемых значений амплитуды сигнала по выборке размером в 500 отсчетов и рассчитывались ее основные параметры: математическое ожидание m , дисперсия σ^2 и отношение σ/m .

Поскольку радиолокатор МРЛ-5 имеет два канала, а применяемый АЦП являлся также двухканальным, то была возможность получать результаты от каждого элемента разрешения одновременно на двух длинах волн (3 и 10 см).

Методика проведения экспериментов была следующей:

1. По штатным индикаторам радиолокатора просматривалось окружающее пространство, обнаруживались области осадков, и оценивались возможности их исследования.
2. При помощи штатных аттенюаторов на входе приемника вводились затухания сигнала, что позволяло согласовать его амплитуду на выбранной дальности с параметрами АЦП. Это обеспечивало отсутствие ограничений при усилении и преобразовании.
3. Двухканальный АЦП с частотой дискретизации $f_d = 80$ МГц оцифровывал принятые по двум каналам сигналы. Запуск АЦП производился в момент излучения зондирующего импульса, после чего данные набирались в виде 65500 отсчетов отраженного сигнала на каждый зондирующий импульс для 500 последовательных зондирующих импульсов. В результате формировался массив данных в виде ряда значений, перекрывающих диапазон дальностей от 0 до 122 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе эксперимента, проходившего с осени 2021 года по весну 2022-го, наблюдались обложные осадки в виде дождя или снега. Всего было зафиксировано шесть положений антенны в азимутальной плоскости, при которых наблюдались от одного до нескольких зон осадков, расположенных на разных дальностях.

При каждом таком положении антенны ее угол места несколько раз изменялся в зависимости от высоты верхней границы исследуемых облаков. На каждой паре выбранных углов фиксировались отражения по всей протяженности метеобъекта в данном направлении, составлявшей от 3 до 10 км.

Таким образом, был накоплен большой объем материала, который обрабатывался согласно приведенной выше методике.

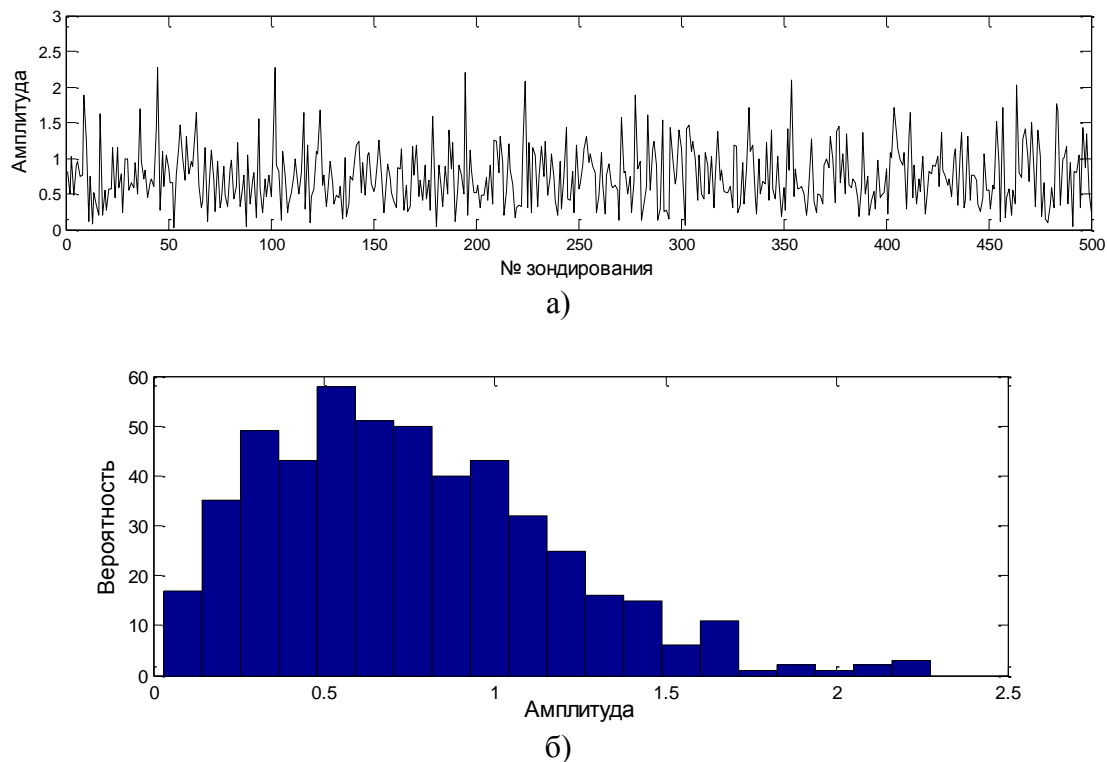


Рис. 5. Пример реализации амплитуды сигнала при отражении сигнала от жидких осадков, находящихся на дальности 32,7 км для канала с длиной волны $\lambda=3$ см (а) и гистограмма его распределения (б)

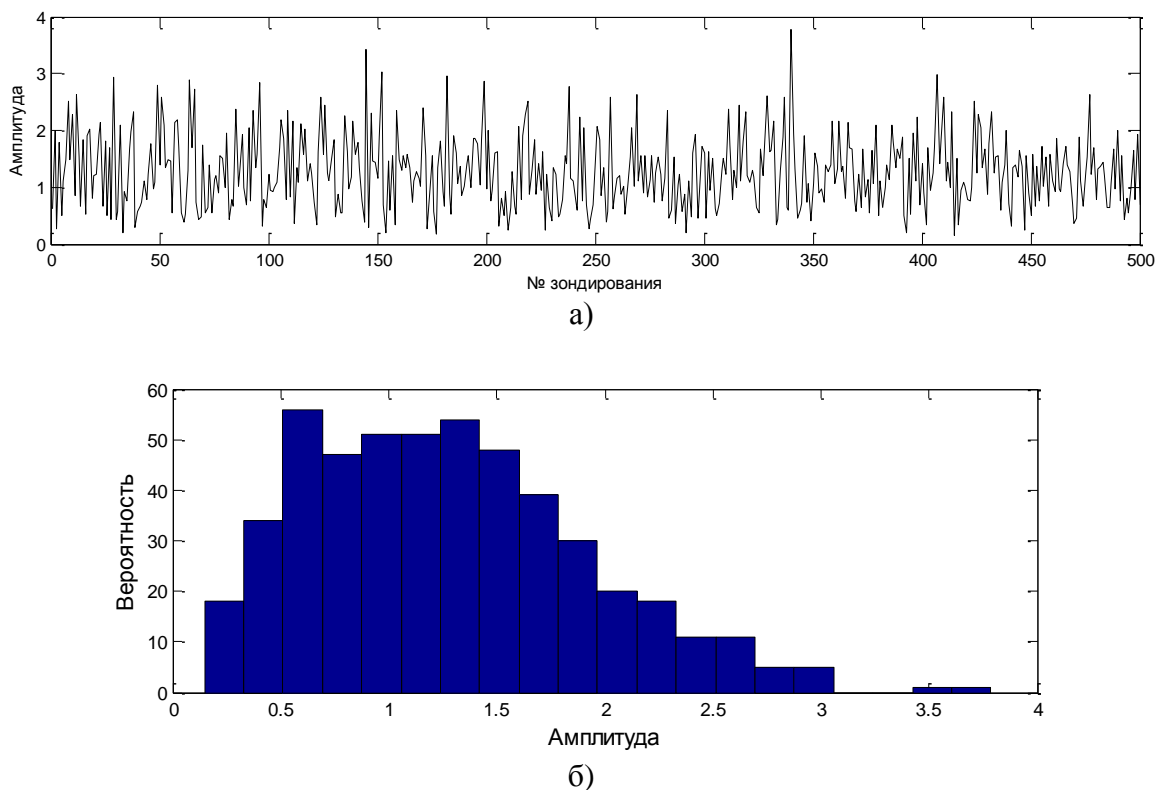


Рис.6. Пример реализации амплитуды сигнала при отражении сигнала от жидких осадков, находящихся на дальности 32,7 км, для канала с длиной волны $\lambda=10$ см (а) и гистограмма его распределения (б)

Примеры полученных реализаций амплитуд сигналов для I ($\lambda_I = 3$ см) и II ($\lambda_{II} = 10$ см) каналов и соответствующие им гистограммы распределения представлены на рис. 5 и 6 соответственно. Метеоцель находилась на расстоянии $R = 32,7$ км, на азимуте $\alpha = 36^\circ$ и угле места $\beta = 0,6^\circ$. Радиолокатор был расположен в 40 км севернее Санкт-Петербурга

При рассмотрении полученных плотностей распределения можно заключить, что по форме они очень близки к релеевской. Для первичной проверки данного предположения в качестве критерия было выбрано отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению, которое при законе распределения Релея определяется формулой [6]

$$N = \frac{\sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \approx 0,53.$$

Для всех реализаций, по которым были проведены расчеты, эта величина находилась в пределах 0,47–0,58, что предварительного подтверждает проверяемую гипотезу.

К сожалению, за время проведения эксперимента в поле зрения авторов не попало ни одного кучево-дождевого облака. Исследование подобных объектов представляет значительный интерес и будет обязательно реализовано в дальнейших наблюдениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накопленный опыт в проведении исследований сигнала, отраженного метеообразованием, говорит о крайней важности условий, при которых они проводятся и, в первую очередь, параметров применяемых технических средств. Нелинейность усилителя, наличие ограничений сигнала, несогласованность его уровня с параметрами преобразователя, недостаточная частота дискретизации, попадание в разрешаемый объем радиолокатора местных предметов – все это способно исказить получаемую информацию и свести на нет все усилия экспериментаторов. Делая какие-либо заключения, основанные на чужих данных без тщательной проверки обстоятельств их получения, можно легко впасть в заблуждение. Поэтому авторы считают для себя возможным полагаться только на результаты собственных экспериментов, в корректности получения которых они уверены.

Были проведены многочисленные измерения распределения плотности вероятности амплитуды отражений от метеорологических целей при различных условиях с использованием как штатных средств радиолокатора МРЛ-5, так и разработанных специально для данной цели. Их результаты позволяют сделать вывод о том, что во всех случаях распределение близко к релеевскому по критерию отношения среднеквадратического отклонения к среднему значению. Это дает возможность сделать предварительный вывод о нормальности распределения исследуемых отражений.

Работа подготовлена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00378 (<https://rscf.ru/project/21-19-00378>).

Список используемых источников

1. Knight Charles A., Miller L. Jay Early Radar Echoes from Small, Warm Cumulus: Bragg and Hydrometeor Scattering // National Center for Atmospheric Research. Boulder Colorado Manuscript received 6 August 1997. – 1998. – 9 January.

2. Исследование распределения плотности вероятности отражений от осадков на базе радиолокатора МРЛ-5 / В. Ю. Жуков [и др.] // Всероссийские открытые Армандовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром, 28–30 мая 2019 года. – Муром: Муромский ин-т (филиал) Гос. образовательное учреждения высш. профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2019. – С. 285–290 с.

3. Горелик А. Г., Денисенков Д. А., Коломиец С. Ф. Распределение флуктуаций огибающей при обратном рассеянии простого радиоимпульса на частицах разреженных сред // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. – Т. 20, № 6. – С 164–172.

4. Коломиец С. Ф., Горелик А. Г. Исследование микроструктуры рассеивающей среды при многоволновом зондировании // Распространение радиоволн: тр. XXVI Всерос. открытой науч. конф. Казань, 01–06 июля 2019 года.: в 2 т. – Казань: Казанский (Приволжский) федер. ун-т, 2019. – Т. 2. – С. 286–289.

5. Жуков В. Ю., Шукин Г. Г. Современные проблемы метеорологической радиолокации // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 10. – С. 927–939.

6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1969. – 752 С.

В. И. Денисова*;

С. В. Журавлев*;

кандидат физико-математических наук;

Н. Г. Котонаева*;

доктор физико-математических наук, доцент;

И. В. Романов*;

кандидат физико-математических наук;

К. Г. Цыбуля*;

кандидат физико-математических наук

*Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва.

РАЗВИТИЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Рассмотрено состояние дел в вопросах ионосферного обеспечения Вооруженных Сил РФ Государственной системой мониторинга геофизической обстановки, включающей средства наблюдения, программное обеспечение обработки данных, систему ионосферного моделирования, программное обеспечение для создания информационной продукции.

Ключевые слова: мониторинг ионосферы, радиозондирование ионосферы, ионосферные модели, информационная продукция.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Требованиями к проведению наблюдений для определения гелиогеофизических характеристик окружающей среды, утвержденными приказом № 524 Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации 30 июля 2020 года, проведение наблюдений для определения ионосферных характеристик включает осуществление одного или нескольких видов наблюдений, к которым можно отнести:

- а) вертикальное радиозондирование ионосферы;
- б) наклонное радиозондирование ионосферы;
- в) наблюдения за полным электронным содержанием;
- г) наблюдения интегрального поглощения в ионосфере Земли радиоизлучения космических источников;
- д) оптические наблюдения авроральной зоны.

ФГБУ «ИПП» осуществляет мониторинг ионосферы за счет двух видов наблюдений: вертикального радиозондирования ионосферы и наблюдений за полным электронным содержанием. В ведении института находятся система ионозондов вертикального радиозондирования «Парус А», а также радиотомографический сегмент ионосферной сети, обеспеченный приемниками сигналов навигационных спутников.

Ионозонды – широкополосные радиолокаторы коротковолнового диапазона, предназначенные для измерения параметров ионосферы. Ионозонды «Парус А» расположены в основном в среднеширотных и юго-среднеширотных районах нашей страны. Они были установлены в период 2011–2014 годов. Однако с каждым годом становится более актуальным вопрос об их замене.

Данные с наблюдательных платформ ассимилируются в ионосферную модель SIMP 2, а уже по полученным распределениям электронной плотности строятся прогнозы состояния ионосферы и рассчитываются параметры радиотрасс. Модель SIMP 2 является связующей

ние между вершинами по всем осям становится меньше, чем заданная точность определения параметров, происходит выход из цикла алгоритма.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НОВОГО СЕТЕВОГО ИОНОЗОНДА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

В ходе разработки проблемы замены парка работающих на ионосферной наблюдательной сети ионозондов вертикального радиозондирования (ВЗ) возникла необходимость выполнить задачу выбора актуальных технических решений по созданию нового средства наблюдений.

Анализ мирового рынка техники радиозондирования ионосферы показывает, что большинство ионозондов вертикального радиозондирования (*Cadi*, *DPS-4*, «Диназонд-21», «Томион», «Радуга» и др.) производятся малыми научно-производственными предприятиями. Сама специфика применения ионозондов ВЗ в научных целях предполагает изготовление единичных экземпляров. Мелкосерийное производство применяется для оснащения ионосферных наблюдательных сетей. Производить ионозонды на заводах в промышленном масштабе нерентабельно, вследствие использования трудоемких технологий и отсутствия их массового потребления.

В основном ионозонды ВЗ используются в научных и мониторинговых целях, требования к их характеристикам существенно различаются. Ионозондам научного применения требуется широкая функциональность используемых инструментов, позволяющая измерять тонкие эффекты в ионосфере. Например, получать информацию о скорости дрейфа электронной плазмы, частоте соударений электронов с нейтральными частицами, значении критических частот, а также угловые и пространственные величины распределения электронной плотности и др. Обычно стоимость таких инструментов и специализированного программного обеспечения значительна. При этом аппаратная и программная структура таких ионозондов сложна. Такой ионозонд требует применения сложной антенной системы значительных размеров.

Специфика применения ионозондов на наблюдательной сети мониторинга ионосферы отличается от научного применения. В связи с этим требования к сетевым ионозондам совершенно иные: не предъявляются требования к широкому функциональному набору измеряемых параметров, в работе достаточно определения критических частот слоев ионосферы и действующих высот. На первые места выходят требования, предъявляемые к условиям эксплуатации аппаратуры. Сетевому ионозонду важно обеспечить бесперебойную длительную продолжительность работы, надежность, ремонтпригодность, удобство управления и диагностики, совместимость работы со смежным электронным и радиооборудованием, воспроизводимость метрологических характеристик.

Назначение применения аппаратуры на сети ионосферных станций и используемые руководящие и эксплуатационные документы определяют метрологические, технические и эксплуатационные характеристики « сетевого » ионозонда. Основными определяемыми метрологическими характеристиками ионозонда являются частота излучаемого сигнала и запаздывание принятого сигнала в измеряемых диапазонах. Знание частот и запаздывания принятых сигналов позволяет восстановить высотно-частотную характеристику ионосферы – ионограмму.

Ионосфера является неоднородной и нестационарной средой. Условия распространения зондирующих сигналов в ней могут изменяться значительно в течение сезона, суток, а при геомагнитных возмущениях и в течение часов и минут. Запас по динамическому диапазону измерений основных параметров ионосферы определяется техническими характеристиками, которые являются дополнительными к метрологическим, но не менее важными. Их значение оказывает решающее влияние на измеряемые характеристики: оно определяет качество, стабильность и условия получения ионограмм. Такими характеристиками являются: диапазон

частот, мощность передатчика, коэффициент усиления приемной и передающей антенн, диаграмма направленности антенн, разделение поляризационных компонент, время сеанса зондирования, чувствительность и избирательность приемника и др.

Эксплуатационными характеристиками (ЭХ) ионозонда являются: надежность, готовность, приспособленность к техническому обслуживанию, экономичность, безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность. Значения ЭХ ионозондов имеют критическую важность для наблюдательной сети в целом. Дело в том, что ионозонды нередко эксплуатируются в удаленных регионах страны в небольших населенных пунктах, где штатное расписание ионосферных наблюдательных пунктов может быть недоукомплектовано высококвалифицированным техническим персоналом. Сотрудники не имеют возможности оперативно проводить техническое обслуживание и производить мелкий ремонт узлов составных частей ионозонда. Отсутствует доступ к запасным частям ионозонда и возможности оперативной доставки персонала из-за неразвитой логистики. Удаленное размещение ионозондов часто связано с пониженным качеством электропитания, что негативно сказывается на безотказности и долговечности работы. Это накладывает особые требования к надежности работы аппаратуры.

Размещение сетевого ионозонда должно учитывать взаимное влияние его работы на смежное радио и измерительное оборудование. То есть должны выполняться требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры. Необходимо принять меры по обеспечению электробезопасности оборудования. Пути повышения ЭМС могут быть:

- уменьшение мощности передатчика;
- уменьшение длительности сеанса радиозондирования.

Кроме того, одной из основных проблем техники радиозондирования ионосферы является необходимость установления соответствия между временем проведения сеанса диагностики ионосферы и длительностью различных физико-химических процессов в ней. Тенденция в развитии техники радиозондирования, направленная на сокращение времени сеанса получения одной ионограммы, ведет к появлению возможности регистрировать и изучать быстропротекающие процессы в ионосфере. Именно это направление исследований было выбрано как наиболее важное при создании модели ионозонда, призванного стать основой сетевого ионозонда нового поколения ионосферной наблюдательной сети Росгидромета.

На полевой экспериментальной базе ФГБУ «ИПГ» (ст. Электроугли) был развернут макет сетевого ионозонда, на котором проводились пробные сеансы радиозондирования с целью выявления путей повышения электромагнитной совместимости. В качестве излучающей антенны использовалась коротковолновая антенна зенитного излучения типа «ромб». В качестве приемной антенны использовалась 8-элементная активная приемная антенна. Антенным элементом приемной антенны является симметричный вибратор [3].

В экспериментах оценивалась возможность восстановления параметров ионосферы при уменьшении излучаемой мощности и уменьшении времени сеанса радиозондирования. В экспериментах последовательно варьировалась импульсная мощность передатчика от 10 до 4000 Вт и изменялась длительность сеанса радиозондирования. Уменьшение импульсной мощности компенсировалось накоплением сигналов за счет повторения количества импульсов на одной частоте в сеансе, при этом увеличивалось время излучения сигналов радиозондирования. Количество повторов на одной частоте изменялось от 1 до 64 шт., время излучения сеанса зондирования варьировалось от 2,0 с до 5 мин. В экспериментах использовались сигналы с амплитудной импульсной модуляцией и сигналы с фазокодовой манипуляцией. Ряд предварительных технических и организационных мероприятий по сбору и настройке экспериментального макета и разработке программного обеспечения позволил реализовать на макете режим радиозондирования ионосферы с перекрытием интервалов передачи и приема для различающихся частот и режимы радиозондирования с фазово-кодовой манипуляцией. На рис. 2 приведен пример ионограммы, полученной на макете сетевого ионозонда ВЗ.

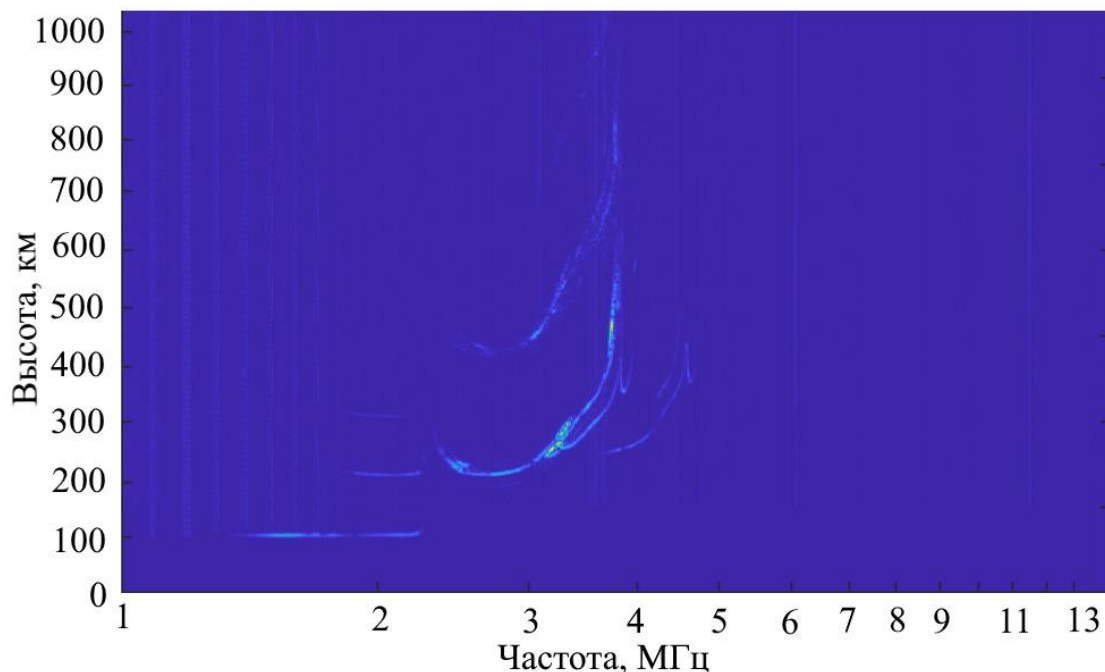


Рис. 2. Ионограмма нового ионозонда вертикального радиозондирования (ст. Электроугли)

Важной частью комплексного мониторинга ионосферы наряду с наземными измерениями являются измерения с бортов космических аппаратов – внешнее радиозондирование [4]. Наземное вертикальное радиозондирование предоставляет информацию о значении критических частот и действующих высот ниже максимума ионосферы. Внешнее радиозондирование предоставляет информацию о параметрах ионосферы выше. Использование бортовых ионозондов, находящихся на орбите Земли, дает возможность реализовать комплексный мониторинг ионосферы, включая совместное применение космического сегмента и сети наземных ионозондов для определения критических частот максимума ионосферы методом трансionoсферного радиозондирования. При этом сигналы бортового ионозонда принимаются наземными ионозондами.

В России готовится к запуску на орбиту КА «Ионозонд» с размещением бортовых ионозондов «Лаэрт» [5]. Параметры излучаемых бортовым ионозондом сигналов позволят восстанавливать трансionoграммы [6] на трассе «бортовой ионозонд – ионозонд ВЗ». В связи с этим становится актуальной задача экспериментальной отработки приема сигналов бортового ионозонда в наземных условиях. Для этого на полевой экспериментальной базе ФГБУ «ИПГ» проводился наземный эксперимент: в качестве бортового ионозонда использовались сигналы ионозонда «Парус-А» (ст. Троицк), в качестве наземного ионозонда применялся макет. Взаимное расположение участвующих в эксперименте ионозондов представлено на рис. 3,а.

Прямое расстояние между расположением между станциями, участвующими в эксперименте, составляло 70 км. Линия горизонта, а также естественные и рукотворные преграды между антеннами ионозондов не позволяли регистрировать сигналы наземной волны. Прием и передача осуществлялись только ионосферной волной. На рис. 3,б представлен результат приема ионограммы с применением сигналов, аналогичных сигналам при работе бортового ионозонда «Лаэрт». Полученный по итогам экспериментов результат позволяет судить о принципиальной возможности использования перспективного ионозонда для приема и обработки сигналов внешнего радиозондирования.

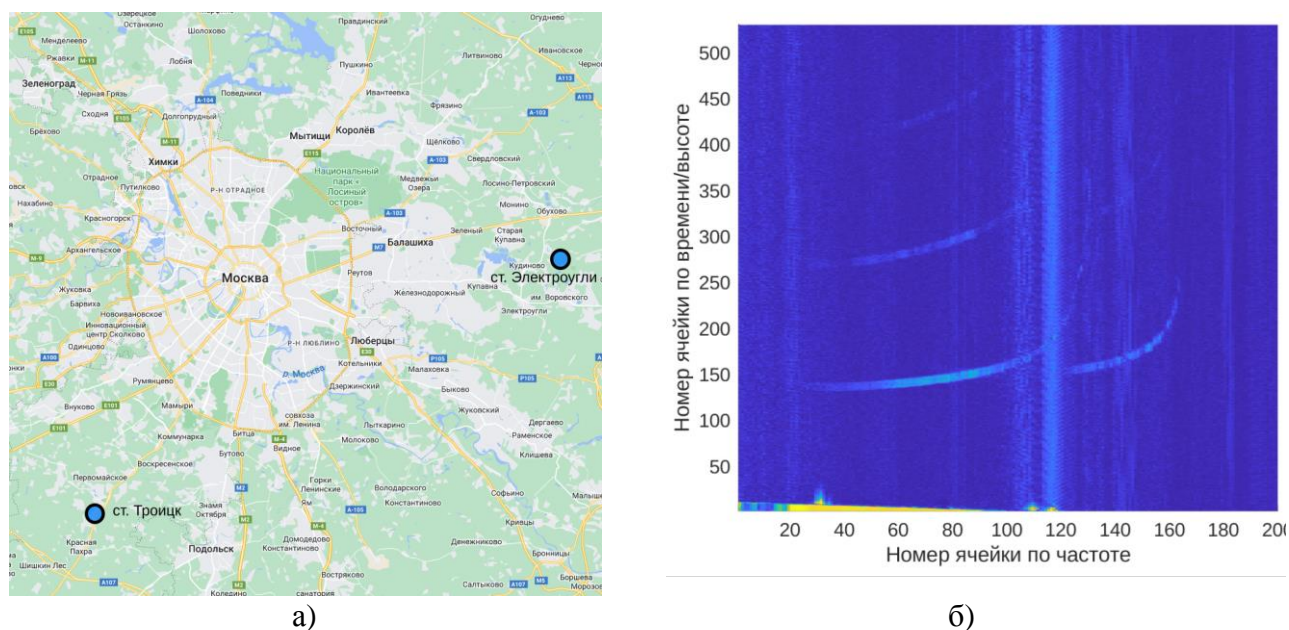


Рис. 3. Карта проведения эксперимента (а): ст. Троицк – передатчик ионозонда «Парус-А», ст. Электроугли – приемник макета; рабочая ионограмма (б), полученная в ходе эксперимента с имитацией сигналов бортового ионозонда «Лаэрт»

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ИОНОСФЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Последние несколько лет характеризовались беспрецедентно низким уровнем солнечной активности, что, в свою очередь, выразилось в низких, не наблюдаемых ранее значениях глобальных ионосферных индексов. Это привело к тому, что локальные ионосферные модели, внедренные в систему ионосферного мониторинга SIMP 2, стали давать сбой в зимние ночные часы. Актуализировалась задача пересчета коэффициентов модели с учетом накопленных данных последнего цикла солнечной активности.

Построены и верифицированы статистические функции локальных моделей слоя F2 по станциям российских и зарубежных ионосферных наблюдательных пунктов. Методика построения локальных моделей утверждена методической комиссией Росгидромета в качестве основной.

Локальная модель представляет собой функцию, дающую наиболее типичное (медианное) значение критической частоты f_oF2 в этой географической точке для заданного месяца M , часа всемирного времени UT и индекса ионосферной активности T :

$$f_oF2_n = A(M, UT) + B(M, UT)T + C(M, UT)T^2 + D(M, UT)T^3.$$

Коэффициенты A , B , C , D были подобраны методом регрессии (двумерной оптимизации) по существующим рядам наблюдений. Методика разработана в ходе создания модели SIMP-STANDARD. Тогда же была произведена и апробация локальных моделей. Верификация моделей на примере станций Ростов и Москва, в сравнении с известными моделями, дала результаты, приведенные в табл. 1.

В табл. 1 даются ссылки на модели:

Shub T – динамическая модель f_oF2 ИЗМИРАН (автор В. Н. Шубин);

IRI 12 – Международная ионосферная модель в версии 2012 года;

SMI88 – ГОСТ 25645.146-89 «Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов»;

RGM – локальная ионосферная модель по конкретной станции.

Верификация показывает превосходство обновленных локальных моделей в расчете медианы критической частоты ионосферы даже в периоды низких значений глобальных ионосферных индексов.

Таблица 1

Верификация локальных моделей

Станция Модели ионосферы	Москва			Ростов		
	Остаточное СКО, МГц	Среднее откл. от наблюдений, МГц	Среднее относит. откл., %	Остаточное СКО, МГц	Среднее откл. от наблюдений, МГц	Среднее относит. откл., %
Shub T	0.52	0.02	7.75	0.54	0.14	0.42
IRI 12	0.57	-0.03	8.73	0.57	-0.05	0.50
SIMP1	0.32	-0.00	4.93	0.36	-0.02	0.27
RGM	0.30	0.00	4.66	0.35	0.00	0.26
SMI88	0.69	-0.04	11.34	0.59	0.04	0.64

Был изменен также метод ассимиляции результатов локальных моделей: был использован более гибкий алгоритм кригинга вместо прежнего метода мультиквадриков. За счет оптимизации было значительно увеличено быстродействие программы.

В обновленной системе ионосферного мониторинга SIMP2 реализуется метод ассимиляции данных сетей приемников ГНСС. Влияние солнечной активности на ионосферу в SIMP учитывается двояко: во-первых, как индекс числа солнечных пятен R_z , который влияет на фоновую модель; во-вторых, как ионосферный индекс T , предоставляемый Австралийской ионосферной службой [7], от которого зависят 75 локальных моделей, созданных для отдельных ионосферных станций. Попытки варьирования каждого из этих двух индексов приводят к разным последствиям. Индекс T сильнее влияет на величину ПЭС вблизи географических точек, где расположены станции с корректирующими локальными моделями, а варьирование индекса R_z в этих точках почти не оказывает влияния. В точках, удаленных от станций, где влияние локальных моделей слабее, ситуация противоположная.

Следует также учесть, что для лучшего учета зависимости от активности Солнца SIMP требует значения индексов за предыдущий, текущий и следующий месяцы. Поэтому, чтобы произвести эффективную ассимиляцию данных вертикального ПЭС в модель SIMP, был выбран простой способ. Он основан на предположении, что, хотя и значения электронной концентрации в максимуме, и значения вертикального ПЭС могут сильно отклоняться от климатического среднего, эти отклонения происходят пропорционально. Иными словами,

$$TEC_{\text{mod}} / TEC_{\text{meas}} = N_m F2_{\text{mod}} / N_m F2_{\text{meas}} = f_o F2_{\text{mod}}^2 / f_o F2_{\text{meas}}^2,$$

где TEC_{mod} , $N_m F2_{\text{mod}}$ и $f_o F2_{\text{mod}}$ – модельные значения ПЭС, пиковой электронной концентрации слоя F2 и критической частоты этого слоя соответственно, а индексом «meas» отмечены экспериментально измеренные значения.

Положительный эффект от ассимиляции данных вертикального ПЭС в модель показан на рис. 4 в виде гистограммы отклонений от измеренной ионозондом величины $f_o F2$.

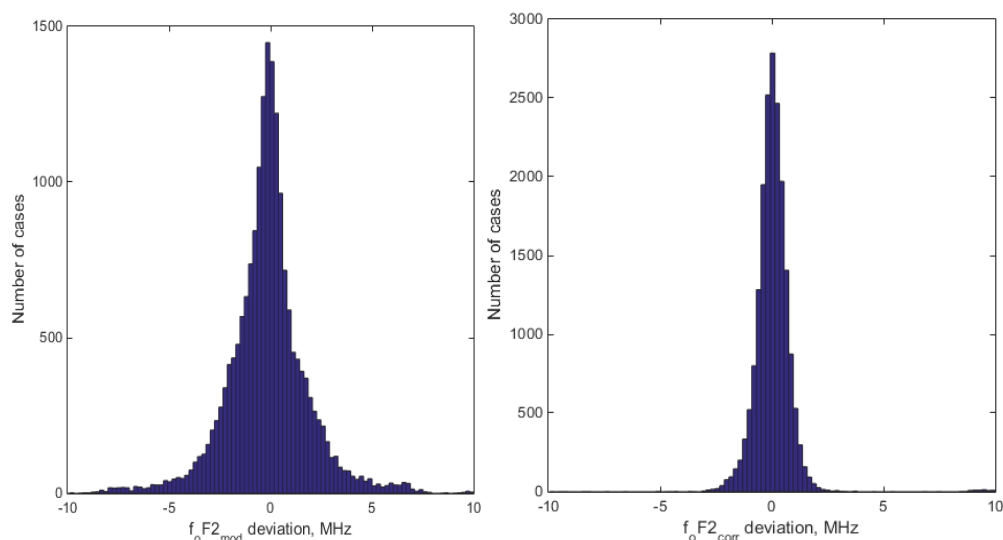


Рис. 4. Гистограммы отклонений от измеренной величины f_oF2 : слева – без ассимиляции данных ПЭС, справа – с ассимиляцией

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Государственная система мониторинга ионосферы постоянно развивается, используя новейшие технические и теоретические достижения. Модернизация затрагивает как средства наблюдений, так и используемые модели прогноза и диагноза ионосферных параметров. Расширяется комплекс ионосферной продукции, предоставляемой заинтересованному потребителю, который включает как непосредственно параметры ионосферы, профили концентрации электронов в конкретных точках, так и траекторные и энергетические параметры радиотрасс.

Список используемых источников

1. Duda R. O., Hart P. E., and Stork D. G. Pattern Classification // John Wiley & Sons, second edition. – 1999.
2. Nelder J.A. and Mead R.A. Simplex Method for Function Minimization // Computer Journal. – 1965. – Vol. 7 – P. 308–313.
3. Характеристики приемной антенны комплекса зондирования ионосферы / И. В. Романов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 10-3. – С. 58–61.
4. Внешнее и трансionoсферное радиозондирование в Арктике при наличии нескольких бортовых ионозондов на разновысоких орбитах / Н. П. Данилкин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 662. – С. 73–77.
5. Пулинец С. А. Перспективы спутникового зондирования ионосферы в рамках проекта «ИОНОЗОНД» // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 6. – С. 1–7.
6. Трансионoсферное радиозондирование как основа оперативного прогноза для совершенствования коротковолновой радиосвязи / Н. П. Данилкин [и др.] // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. – 2020. – № 4 (50). – С. 76–83.
7. Caruana J., The IPS monthly T index, Solar-Terrestrial Predictions // Proc. of a Workshop at Leura, Australia. – 1990. – Oct. 16–20. – P. 257–263.

А. П. Доронин*,
доктор технических наук, профессор;
С. И. Козлов**,
доктор физико-математических наук;
В. М. Петроченко*,
кандидат технических наук, доцент;
В. В. Филиппёнок*,
*ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.
**Институт динамики геосфер имени
академика М. А. Садовского РАН, г. Москва.

ИСКУССТВЕННЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ: МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В статье предлагается новая классификация атмосферных образований, включающая в себя облака и туманы естественного происхождения и искусственные атмосферные образования антропогенного происхождения. Рассматриваются методы и технические средства целенаправленного создания искусственных атмосферных образований (искусственных облаков и туманов), а также возможные области их применения.

Ключевые слова: искусственные атмосферные образования, искусственные облака и туманы, химические реагенты, технические средства.

ВВЕДЕНИЕ

Значительное увеличение на современном этапе развития России количества чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного характера (до 400–500 в год [1]) и связанный с ними огромный материальный ущерб, наносимый экономике нашей страны (около 1-2% ВПП [2]), делают актуальной проблему разработки системы мер, методов и средств, позволяющих устранить или снизить их негативные последствия.

В связи с вышеизложенным в последние десятилетия (наряду с совершенствованием системы своевременного информирования и оповещения об опасных природных и техногенных явлениях, модернизацией и расширением наземной гидрометеорологической сети, развитием авиа- и космического компонентов национальной системы мониторинга и прогнозирования гидрометеорологических явлений, строительством плотин, водохранилищ и каналов для регулирования гидрологического режима с целью исключения возможности возникновения наводнения и др.) для борьбы с ЧС природного и техногенного характера все больше внимания уделяется разработке и практическому использованию методов и средств воздействия на природные процессы.

Детальный анализ исследований в данной предметной области свидетельствует о том, что объектом целенаправленного воздействия со стороны человека могут быть процессы и явления, наблюдающиеся практически во всех геосферах Земли (литосфера, гидросфера, атмосфера и околоземное космическое пространство). Следует отметить, что уровень разработки методов и средств воздействия на различные геофизические процессы и явления далеко не одинаков и может меняться от гипотез (как, например, в случае воздействия на вулканы) до практического применения (как, например, в случае воздействия на переохлажденные облака и туманы) [3].

В последние годы все масштабнее проводятся работы в области создания искусственных атмосферных образований, а именно, искусственных облаков и туманов (ИОТ). Исходя из

этого можно сформулировать цель настоящей работы как оценивание возможности и целесообразности решения ряда хозяйственных и экологических задач путем создания ИОТ.

КЛАССИФИКАЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОБЛАЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

В работе предлагается классификация атмосферных облачных образований, приведенная на рис. 1 [4].

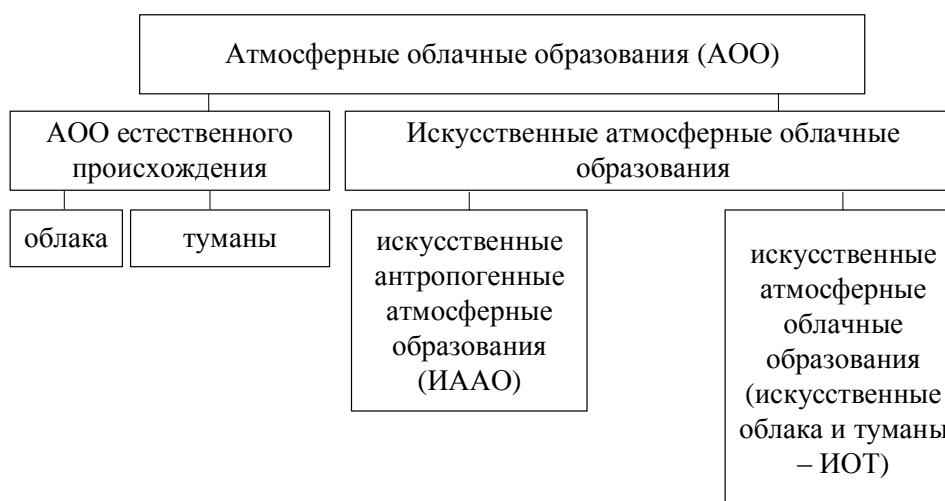


Рис. 1. Классификация атмосферных облачных образований

Облака и туманы естественного происхождения достаточно подробно описаны в литературе [5], поэтому кратко остановимся на характеристике искусственных антропогенных атмосферных образований, являющихся побочным следствием деятельности хозяйственных отраслей (рис. 2) [6].

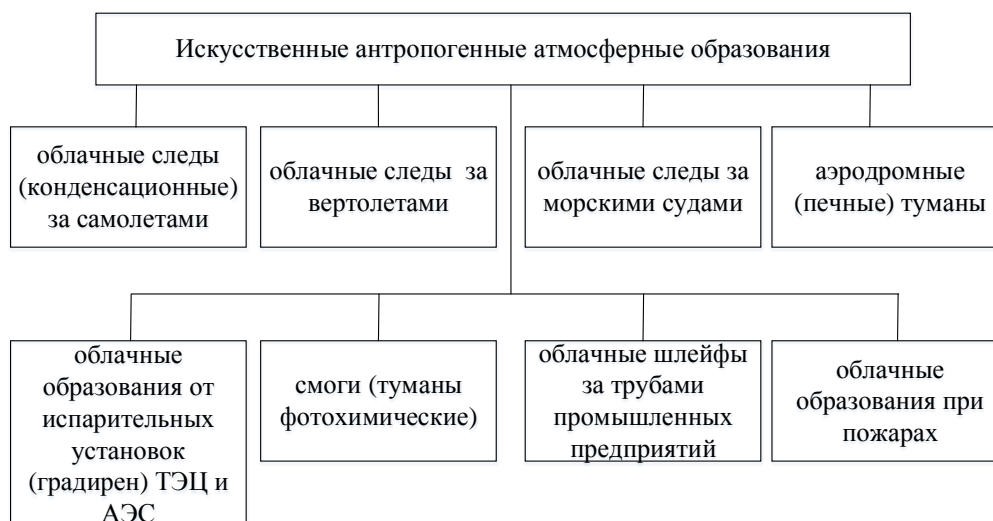


Рис. 2. Классификация искусственных антропогенных атмосферных образований

Из анализа данных рис. 2 следует, что имеются восемь разновидностей ИААО. Некоторые характеристики ИААО приведены в работе [6]. Из рассмотрения данных, приведенных в [6], следует, что ИААО могут возникать в любое время суток, в разные сезоны и в различных

физико-географических районах. Синоптические условия образования ИААО характеризуются следующими величинами: температурой воздуха – от положительных до отрицательных (до минус 40°C и ниже) значений, влажностью воздуха – от 60–70% до 80–90%, скоростью ветра – от штиля до 5 м/с. Геометрические размеры ИААО составляют: в длину – от 10 км до 1–5 тыс. км, в ширину – от 100 м до километров и более.

Антропогенные атмосферные образования могут оказать существенное влияние на состояние экологической обстановки, причем довольно часто это влияние носит отрицательный характер. Наглядным подтверждением тому являются смоги (туманы фотохимические) и задымление атмосферы в крупных городах, обусловленные пожарами (например, задымленность Москвы летом 2010 года).

Вместе с тем представляется важным рассмотреть физические основы и методы целенаправленного создания искусственных атмосферных облачных образований – ИОТ.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ И ТУМАНОВ

Актуальность разработки методов и средств создания ИОТ обусловлена следующими основными причинами [7]:

1. ИОТ являются по существу новым видом антропогенных атмосферных облачных образований.

2. ИОТ позволяют решать широкий круг прикладных задач, а именно, хозяйственных и экологических.

3. Создание ИОТ является экономически выгодным. В ряде случаев при создании ИОТ отношение затрат к доходу, в отличие от воздействия на естественные облака и туманы (1:10), может быть гораздо большим.

4. ИОТ, в частности искусственные перистые облака, созданные на большой территории, позволяют осуществлять воздействие на процессы создания и эволюций крупных барических образований, например тропических циклонов.

5. За рубежом (прежде всего в США) проводятся широким фронтом работы в области разработки методов и средств создания ИОТ.

Физические основы методов создания ИОТ базируются на следующих факторах [5, 7, 8]:

– свойстве гигроскопических веществ (реагентов) способствовать образованию капель тумана (облака) при влажности ниже 100%;

– существовании в атмосфере слоев с пересыщением пара над льдом;

– наличии в пограничном слое атмосферы неустойчивой стратификации температуры.

В качестве примера ниже приведено описание физического механизма образования искусственных перистых кристаллических облаков (ИПКО) [9].

Кристаллические облака могут быть образованы в тропосфере в тех областях, где давление водяного пара выше давления насыщения над льдом ($E_{\text{л}} \leq e \leq E_{\text{н}}$), путем внесения в эти области или создания в них зародышей ледяных кристаллов (ЛК).

При $e \geq E_{\text{л}}$ за счет адсорбции водяного пара зародыши ЛК быстро увеличиваются в размерах, превращаясь в ЛК, а атмосферная диффузия способствует их распространению по вертикали и горизонтали. Экспериментальным доказательством возможности создания ИПКО являются облака в виде конденсационных следов (КС) за самолетами, образующихся в результате сгорания топлива с выделением дополнительной влаги и быстрого замерзания капель.

При $e \geq E_{\text{л}}$ длина КС достигает сотен километров, ширина 3–7 км, а их вертикальная протяженность составляет 0,2–0,5 км. Устойчивые КС могут сохраняться в течение 1–3 ч, превращаясь в перисто-кучевые облака. Экспериментально доказана возможность образования

ИПКО при засеве безоблачной атмосферы хладореагентами (твердой углекислотой) и йодистым серебром. Кроме того, ИПКО по своим микрофизическим параметрам аналогичны естественным кристаллическим облакам.

Результаты анализа современных отечественных и зарубежных методов создания ИОТ представлены на рис. 3 [7, 10].



Рис. 3. Методы создания искусственных атмосферных образований

Из рассмотрения рисунка следует, что основными видами искусственных облаков и туманов являются облака верхнего яруса, нижнего яруса, вертикального развития, а также туманы и низковысотные водно-аэрозольные образования. Уровень разработок методов создания ИОТ достаточно высок и в большинстве случаев включает в себя, наряду с теоретическими и экспериментальными исследованиями, также и проведение натуральных экспериментов. Подтверждением этому положению могут служить данные о технических средствах, реализующих методы создания ИОТ, которые рассмотрены ниже.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ И ТУМАНОВ

Наличие методов создания ИОТ обуславливает необходимость разработки также и технических средств их реализации применительно к каждому из перечисленных видов искусственных атмосферных облачных образований.

К настоящему времени в нашей стране и за рубежом разработаны технические средства создания ИОТ, общая схема классификации которых приведена в табл. 1 [7].

Таблица 1

Технические средства создания ИОТ

Вид искусственного атмосферного образования	Метод создания ИОТ	Технические средства реализации метода создания ИОТ
Перистые кристаллические облака	Использование топлива (керосина) в двигателях самолета	Самолеты типа Ил-62, Ил-76, Ту-154, WC-130, WC-135
	Использование водяного пара	Аналогичные самолеты, имеющие на борту емкости H ₂ O (с другими растворами)
	Использование хладагентов	Аналогичные самолеты, оснащенные углекислотными установками
	Применение кристаллизующих реагентов	Аналогичные самолеты, оснащенные аэрозольными генераторами
	Использование заряженных частиц	Проект
Конвективные облака	Использование метеотронов	1. Открытые горелки (метеотрон «Десена»). 2. Струйные огнеметы (метеотрон Новикова). 3. Турбореактивные двигатели (метеотроны ИПГ)
	Применение гигроскопических веществ	Самолеты типа Ан-12, Ан-30М, Як-40, Ан-26, WC-130 и другие, оснащенные устройствами для диспергирования гигроскопических реагентов (ГР)
	Распыление мелкодисперсной сажи (в тропиках)	Самолеты типы В-1, В-25, «Боинг-747», оснащенные генераторами для диспергирования сажи
	Изменение альbedo подстилающей поверхности	Различные инженерные средства, изменяющие характер подстилающих поверхностей (асфальтирование, зачернение)
	Комбинированный метод	1. Метеотроны + думы + гигроскопические реагенты. 2. ТСМ-65Д+АРС-14, ТДА-2К, ТДА-3А (водные растворы ГР)
Волнистообразные облака	Использование вертолетов	1. Турбовинтовые вертолеты Ми-8, Ми-26
	Применение ГР с летательных аппаратов	Применение ГР с летательных аппаратов: Ан-12, Ан-30М, Як-42Д, WC-130 и др.
	Применение хладореагентов	Применение хладореагентов с летательных аппаратов: Ан-12, Ан-30М, Як-42Д, WC-130 и других, оснащенных углекислотными установками
	Использование кристаллизующих реагентов	Применение ГР с летательных аппаратов Ан-12, Ан-30М, Як-42Д, WC-130 и других, оснащенных генераторами аэрозолей кристаллизующих реагентов
	Комбинированный метод	ТСМ-65Д+АРС-14, ТДА-2К, ТДА-3А (водные растворы ГР)
	Освобождение акваторий зимой ото льда	Использование ледоколов различных типов для раскрытия акваторий ото льда
	Использование судов	Суда различных типов

Окончание табл. 1

Вид искусственного атмосферного образования	Метод создания ИОТ	Технические средства реализации метода создания ИОТ
Туман	Диспергирование воды при $T < 0^\circ\text{C}$ в подынверсионный слой атмосферы	ТСМ-65Д, АРС-14 (вода)
	Использование ГР	Наземные установки для диспергирования ГР
	Применение пиротехнических составов	Использование пиротехнических средств на основе ГР
	Применение хладореагентов (сухой лед и др.)	Применение углекислотных установок, расположенных на земле
	Использование аэрозолей кристаллизующих реагентов	Использование генераторов аэрозолей кристаллизующих реагентов
	Комбинированный метод	ТСМ-65Д+АРС-14, ТДА-2К, ТДА-3А (водные растворы ГР)
	Раскрытие акваторий зимой от ледового покрова	Применение морских судов, способных разрушать ледовый покров
	Распыление мелких капель воды в атмосферу при низких температурах воздуха	ТСМ-65Д + АРС-14, ТДА-2К, ТДА-3А (вода)
	Использование ТРД при $T < -28^\circ\text{C}$	ТСМ-65Д
	Вода + ПАВ	Использование водных растворов: ТСМ-65Д + АРС-14, ТДА-2К, ТДА-3А (вода + ПАВ)
Низковысотные водно-аэрозольные образования	Комбинированные завесы	ТСМ-65Д, АРС-14, ТДА-2К, ТДА-3А (водные растворы ГР + дымы)

Наличие методов и технических средств создания ИОТ обуславливает необходимость проведения исследований по обоснованию областей их применения для решения различного рода прикладных задач (хозяйственных и экологических).

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИОТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

На рис. 4 приведен перечень решаемых при создании ИОТ прикладных задач.

В качестве примера решения перечисленных выше задач в работе рассмотрен способ борьбы с заморозками искусственными туманами с помощью термокинетических установок, предложенный в работе [11]. Расчеты, приведенные в этой работе, показывают, что для защиты сельскохозяйственных культур от заморозков на площади 8 км^2 ($2 \times 4 \text{ км}^2$) для создания теплого тумана потребуется четыре машины ТСМ-65Д и четыре машины АРС-14 в течение трех часов и расход пяти тонн химического реагента (карбонида марки В) для приготовления 20%-ного водного раствора данного вещества.

Сравнительный экономический анализ стоимости расхода предлагаемого водного раствора для создания искусственного тумана в качестве средства защиты сельхозкультур от заморозка с дымовой аэрозольной завесой, создаваемой на аналогичной площади с применением тех же технических средств (четыре машины ТСМ-65Д и четыре машины АРС-14) в течение трех часов при сжигании 25 тонн смеси на основе нефтепродуктов, показывает, что в первом случае стоимость такого мероприятия будет в 6 раз меньше, чем при использовании дымовой аэрозольной завесы.

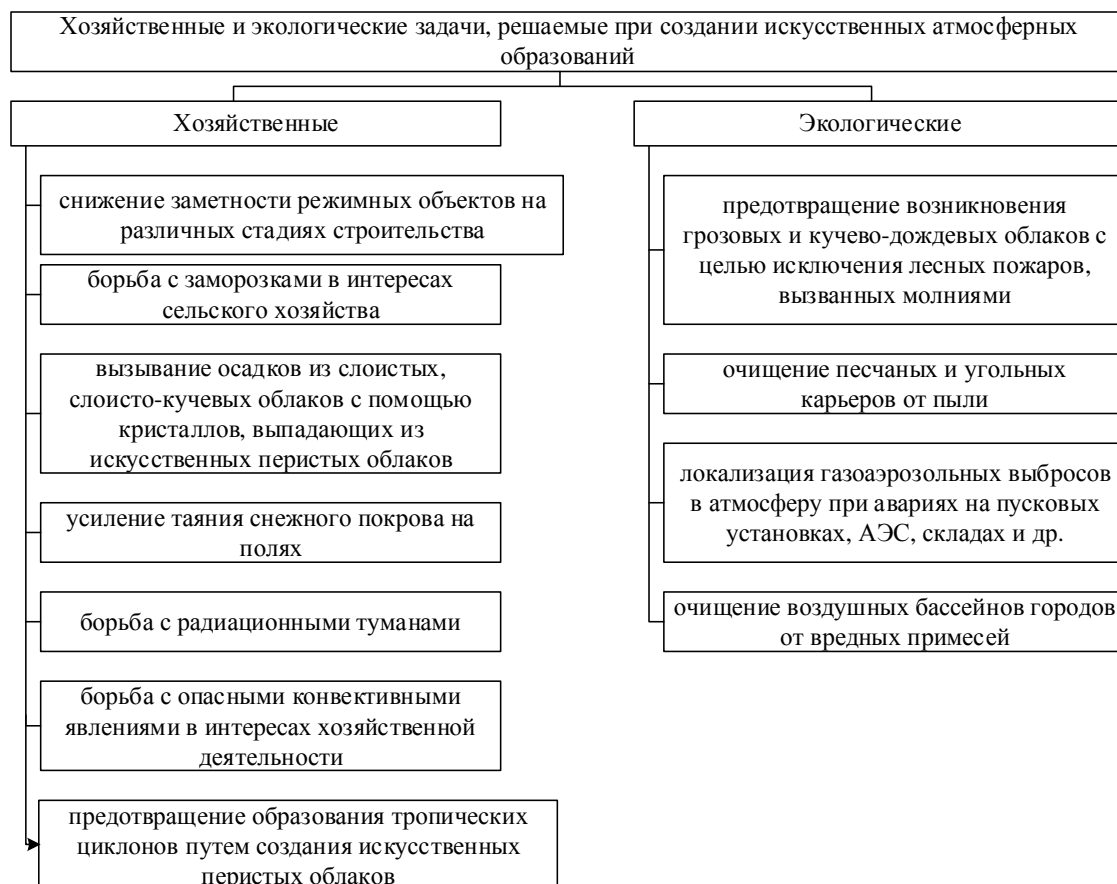


Рис. 4. Перечень решаемых при создании ИОТ прикладных задач

Использование химических реагентов для создания ИОТ неразрывно связано с исследованием экологических последствий их применения. Выполненный в работе [12] анализ таких последствий свидетельствует о том, что применение указанных химических реагентов (твердая углекислота, жидкий азот, йодистое серебро) и водных растворов гигроскопических реагентов (мочевина, поваренная соль, хлористый кальций) и поверхностно-активных веществ (например, порошок СФ-2У) не оказывает сколь-нибудь заметного негативного воздействия на окружающую природную среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате всего вышеизложенного можно сделать ряд выводов.

1. Искусственные облака и туманы являются, по существу, новым видом антропогенных атмосферных образований, которые могут быть целенаправленно созданы человеком для решения широкого круга прикладных задач в различных регионах нашей страны.

2. Рассмотренные в работе методы и средства в ряде случаев прошли экспериментальную проверку в натурных условиях в различных районах России и в разные сезоны года и показали принципиальную возможность создания искусственных теплых туманов, искусственных теплых волнистообразных облаков и облаков вертикального развития.

3. Используемые для создания искусственных облаков и туманов химические кристаллообразующие реагенты и водные растворы гигроскопических веществ не наносят сколь-нибудь заметного вреда природе.

Список используемых источников

1. *Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М.* Состояние и перспективы развития работ по активным воздействиям в Российской Федерации и за рубежом: пленарный доклад // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. 7–9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2015. – С. 151–174.
2. *Фролов А. В.* Современная российская гидрометеорологическая служба: новации и точки роста: пленарный доклад // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда. 7–9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2015. – С. 9–31.
3. К вопросу о классификации воздействий на различные слои атмосферы / А. П. Доронин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 676. – С. 138–144.
4. К вопросу о классификации атмосферных облачных образований // Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга / А. П. Доронин [и др.] // Сборник научных статей по материалам II НПК. 26-27 мая 2015 г. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 31–36
5. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 640 с.
6. Искусственные атмосферные образования и экология / А. П. Доронин [и др.] // Труды Межрегионального семинара «Экология и космос» имени академика К. Я. Кондратьева / под общ. ред. М. М. Пенькова. – СПб., 2014. – С. 121–126.
7. *Доронин А. П.* Воздействия на атмосферные процессы и явления: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 292 с.
8. *Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г.* Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 342 с.
9. Физические основы искусственного образования облачности в верхней тропосфере / В. Н. Козлов [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. – 2014. – Вып. 570. – С. 261–273.
10. Искусственные облака и туманы как перспективное средство решения хозяйственных и экологических задач / А. П. Доронин [и др.] // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 23–27 октября 2017 г., г. Нальчик: сб. науч. тр.: в 2 ч. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – Ч. 2. – С. 141–149.
11. Метод защиты сельскохозяйственных культур от заморозков с помощью термокинетических установок / Я. И. Бражникова [и др.] // Материалы VI Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной Геофизики и контроля состояния природной среды» / Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского. Санкт-Петербург. – 2020. – С. 117–124.
12. Экологические аспекты, связанные с работами по созданию искусственных атмосферных образований в интересах решения хозяйственных и экологических задач / А. П. Доронин [и др.] // Материалы III Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К. Я. Кондратьева / под общ. ред. Ю. В. Кулешова. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – С. 221–225.

А. П. Доронин,
доктор технических наук, профессор;
В. М. Петроченко,
кандидат технических наук, доцент;
В. В. Филиппёнок

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАЙОНЕ СРЕДНЕГО УРАЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ТУМАНОВ В ЦЕЛЯХ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В статье на основе обработки материалов метеорологических наблюдений, содержащихся в информационной базе данных ВНИИГМИ-МЦД, приводятся результаты анализа метеорологических условий (атмосферных явлений и метеорологических величин) в районе Среднего Урала для оценки возможности создания искусственных туманов с целью решения экологических задач.

Ключевые слова: туман, искусственный туман, температура воздуха, влажность воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из серьезных экологических проблемных задач, связанных с индустриальным производством, является засорение атмосферного воздуха токсичными веществами, образующимися в результате деятельности металлургического, химического и других производств. В особенности востребованной эта проблемка становится в случае аварии на промышленном комплексе. Данное обстоятельство указывает на необходимость поиска эффективных способов и средств по снижению уровня засорения атмосферного воздуха.

В некоторых работах [1, 2] предложены способы снижения уровня концентрации засоряющих веществ в воздухе, основанные на применении определенных средств модифицирования атмосферных условий. При рассмотрении этих способов было установлено, что одним из наиболее целесообразных для применения является способ, учрежденный на локализации аэрозольного засорения путем производства неестественного тумана [3].

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что актуальной является задача по оцениванию метеорологических условий, благоприятных для создания искусственных туманов в различных физико-географических районах России.

Целью данного исследования стала разработка модели пространственно-временного распределения метеорологических условий в восточной части Среднего Урала для определения возможности создания искусственных туманов в различные сезоны года в интересах решения экологических задач. Выбор данного района обусловлен тем, что на его территории находятся крупные промышленные центры и города.

ВЫБОР ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА

Для решения задачи производства неприродных туманов нужно определить комплекс метеорологических условий, включающих в себя температурный режим, влажность воздуха, скорость и направление ветра у земли, повторяемость естественных туманов, а также характеристику синоптических ситуаций и атмосферных условий у поверхности земли [4].

В работе использовались данные о скорости и направлении ветра, температуре, влажности и повторяемости естественных туманов на станциях Гари, Верхотурье, Туринская Слобода, Висим, расположенных в восточной части Среднего Урала.

Необходимые для выполнения в настоящей работе материалы исследований получены из базы данных ВНИИГМИ-МЦД с помощью web-технологии удаленного доступа «АИСОРИ».

ХАРАКТЕРИСТИКА СИНОПТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ И АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Основными физическими факторами, приводящими к образованию туманов обычного и искусственного происхождения, являются видоизменения температуры и абсолютной влажности воздуха с дальнейшей конденсацией водяного пара [5].

Для анализа метеорологических условий, благоприятных для создания искусственных туманов, необходимо провести анализ синоптических ситуаций, благоприятных для образования естественных туманов.

Обзор карт погоды позволил выявить, что в режиме атмосферной циркуляции над территорией Среднего Урала господствуют антициклонические барические поля. Всеобщая повторяемость типов синоптических процессов по циклонической и антициклонической деятельности над территорией указанного района приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Повторяемость (число дней) барических образований
над территорией Среднего Урала**

Циклоны	Антициклоны		Промежуточная зона
	стационарные	подвижные	
66	72	73	141

Основные траектории циклонов пролегают с северо-запада на юго-восток. При этом над районами Средней Азии наблюдается малоподвижный высокий антициклон. Скорость перемещения этих барических образований составляет 30–40 км/час. Выход циклонов с юго-запада и особенно с южных траекторий – большая редкость. Циклоны, приходящие с западных траекторий на Урал, уже представлены высокими барическими образованиями. В результате невысокой активности синоптических процессов над районами Среднего Урала устанавливается малоградиентное барическое поле.

Таким образом, характерными синоптическими процессами по общепринятой типизации являются: выходы северо-западного, западного циклонов, волновые возмущения над Чёрным, Каспийским морями, Нижней Волгой (южные циклоны); северо-западная периферия отрога сибирского антициклона; арктическое вторжение холодного воздуха. Данные о повторяемости указанных выше типов синоптических процессов приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что наиболее благоприятные условия для образования адвективных туманов естественного происхождения складываются в теплых секторах циклонов, а для радиационных туманов – в центральных частях и на западных перифериях антициклонов. Эти же синоптические условия могут быть наиболее благоприятными также и для создания искусственных туманов. Отсюда следует, что для создания искусственных туманов наиболее подходящими синоптическими ситуациями являются:

- западный циклон, проходящий с западного в восточное направление вдоль 65-й параллели с. ш. – от 19 до 30% случаев;
- западная периферия антициклона – до 31% случаев;
- малоградиентное барическое поле – до 7% случаев.

Осуществление исследований по разработке искусственных туманов в определенном районе связано с наличием данных о повторяемости туманов обычного происхождения. Среднее число дней с туманом представлено на рис. 1.

Таблица 2

**Повторяемость (%) типов синоптических процессов
над территорией Среднего Урала**

Типы процессов	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Северо-западная депрессия	19	23	22	24	32	39	43	38	32	27	25	21
Западная депрессия	21	19	21	22	25	19	20	22	26	30	28	25
Южная депрессия	12	15	14	11	7	5	3	5	7	9	11	13
Западная периферия отрога сибирского антициклона	31	28	27	26	15	8	3	7	10	15	19	26
Арктическое вторжение холодного воздуха	17	15	16	17	21	29	31	28	25	19	17	15

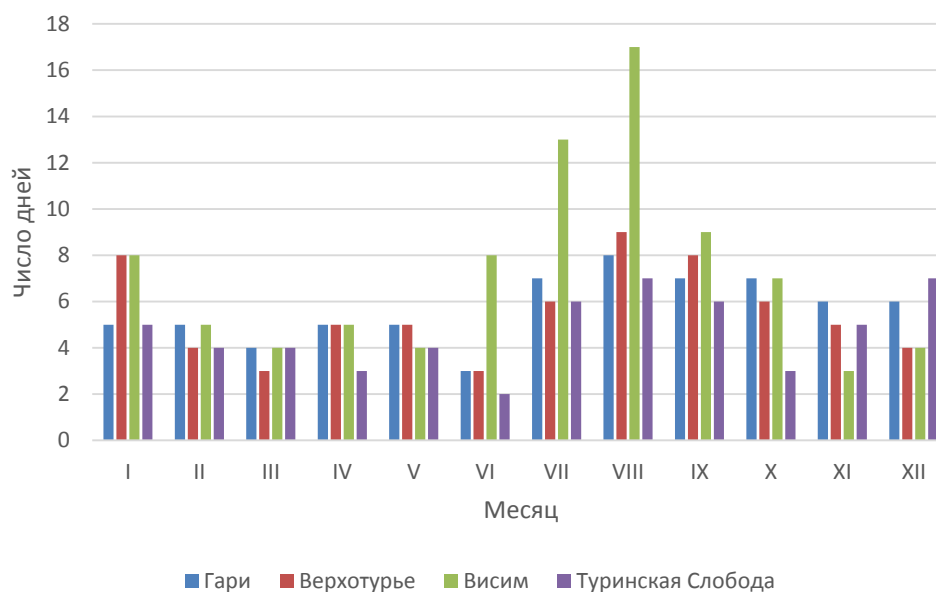


Рис. 1. Среднее число дней с туманом в восточной части Среднего Урала

Обзор данных по этому вопросу показал, что среднее число дней с туманом для рассматриваемого района в холодное полугодие на отдельных станциях доходит от 4 до 8, в теплое – от 9 до 17 (только на станции Висим). На остальных станциях число дней с туманами в данный период года колеблется от 2 до 9. Так, например, в районе Туринской Слободы наибольшее число дней с туманом отслеживается в декабре – до 7 дней в летние месяцы отмечаются наименьшие значения от 2 до 4 дней. Для района Висима туманы отмечаются чаще. При этом наибольшая их часть наблюдается в летние месяцы, от 8 до 17 дней. В зимние месяцы и межсезонье число дней с туманом колеблется от 3 до 8.

Наравне с данными о среднем числе дней с туманом над рассматриваемым районом наибольший интерес представляют данные об их средней длительности. Такие данные представлены на рис. 2.

При оценке средней продолжительности туманов, представленной на рис. 2, можно заключить, что их продолжительность колеблется от 3 до 14 ч в течение года.

В большинстве случаев туманы холодного полугодия связаны с антициклонической деятельностью, они наблюдаются в утренние часы, а их продолжительность составляет не более 2-3 ч. В теплое полугодие продолжительность туманов увеличивается до 8–14 ч, что чаще всего связано с адвекцией тепла при циклонической активности.

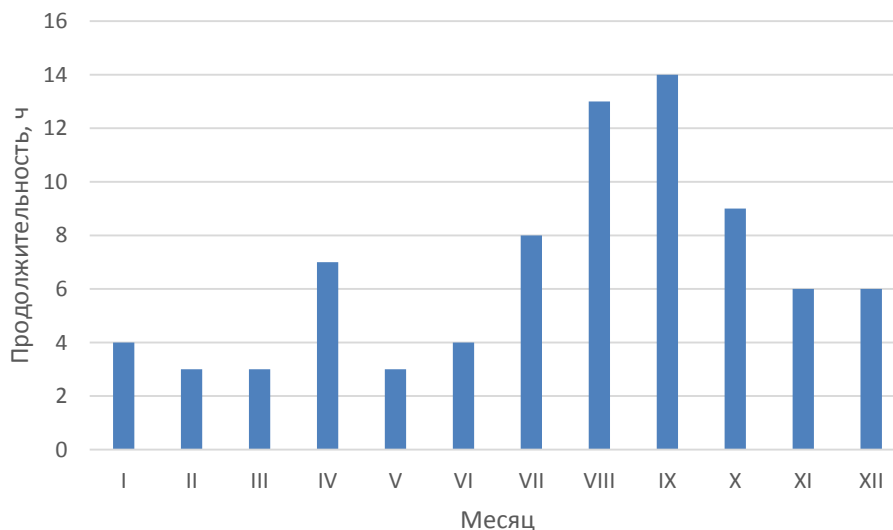


Рис. 2. Средняя продолжительность туманов в восточной части Среднего Урала

Успешность осуществления мероприятий по разработке искусственных туманов во многом определяется ветровым и температурно-влажностным режимами.

Изучение данных о ветровом режиме, представленных в табл. 3, показало, что над выбранными в работе районами господствуют ветра западного направления, от 17 до 36% случаев. При этом в холодное полугодие, наряду с северо-западными и юго-западными ветрами, нередко возникают юго-восточные ветра, обусловленные влиянием западной периферии азиатского антициклона.

Таблица 3

Повторяемость (%) направления ветров и штилей над территорией Среднего Урала

	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
I	10	4	3	12	10	14	36	11	9
II	5	5	5	17	11	13	34	10	8
III	5	3	5	16	12	16	31	12	5
IV	7	5	5	15	14	17	27	12	6
V	13	8	7	10	12	12	22	16	7
VI	18	10	8	9	8	11	19	17	8
VII	19	10	10	10	8	9	17	17	11
VIII	13	8	6	9	8	13	23	20	12
IX	8	4	5	13	13	15	26	16	7
X	6	5	5	11	13	17	35	11	4
XI	4	2	2	15	14	17	35	11	4
XII	6	4	5	18	15	16	28	8	11

Приведенные данные о повторяемости ветров различных направлений для указанного района в холодное полугодие могут быть полезны при планировании, подготовке и проведе-

нии работ по созданию искусственных туманов. Востребованность этих данных повышается при их использовании в сочетании со сведениями о средней скорости ветра.

Исходя из этого на рис. 4 представлены данные о повторяемости значений средней скорости ветра в рассматриваемом районе.

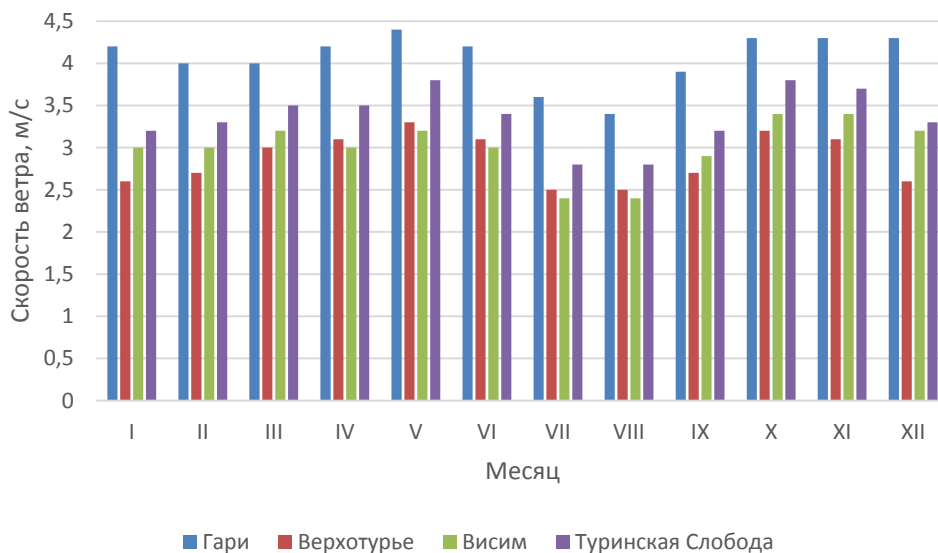


Рис. 4. Повторяемость значений средней скорости ветра

Исследование данного вопроса показало, что ветровой режим для производства искусственных туманов является благоприятным, потому что значения скорости ветра характеризуются величинами в диапазоне 2,4–4,4 м/с.

Вместе с тем представляют интерес также сведения о неблагоприятных для создания искусственных туманов ветровых условиях (скорость ветра более 6 м/с). Такие данные приведены на рис. 5.

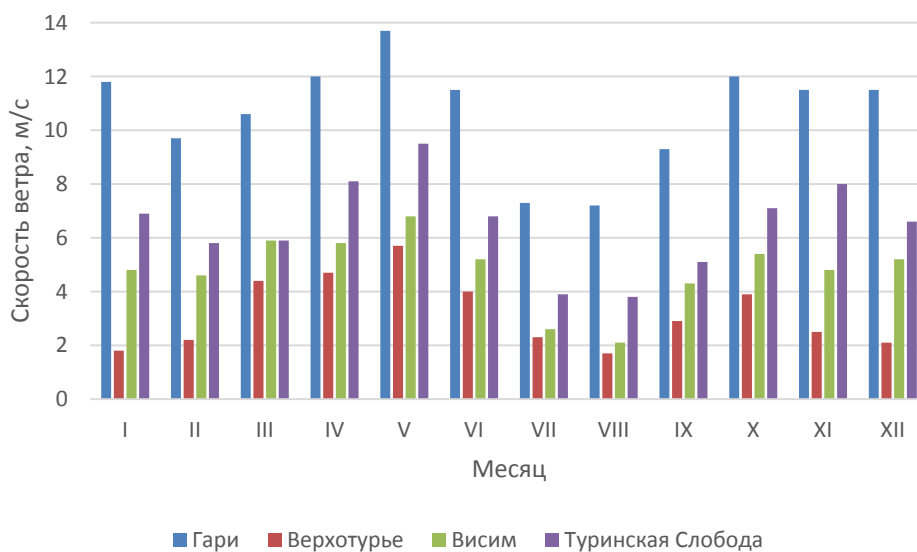


Рис. 5. Среднее число дней с ветром более 6 м/с

Анализируя приведенные на рис. 5 данные, можно видеть, что неблагоприятные для создания искусственных туманов ветровые условия над рассматриваемым районом наблюда-

ются только в северо-восточной его части, что связано в большей степени с местными особенностями рельефа.

Обзор экспериментальных работ [2, 3] по производству искусственных туманов убедительно показал, что получение положительного итога зависит от ряда метеорологических величин, среди которых основное значение имеют температура и влажность воздуха.

Из рассмотрения данных о повторяемости температуры воздуха у поверхности земли следует, что во все месяцы холодного полугодия (за исключением октября) над указанным районом отслеживаются отрицательные значения температуры воздуха (рис. 6).

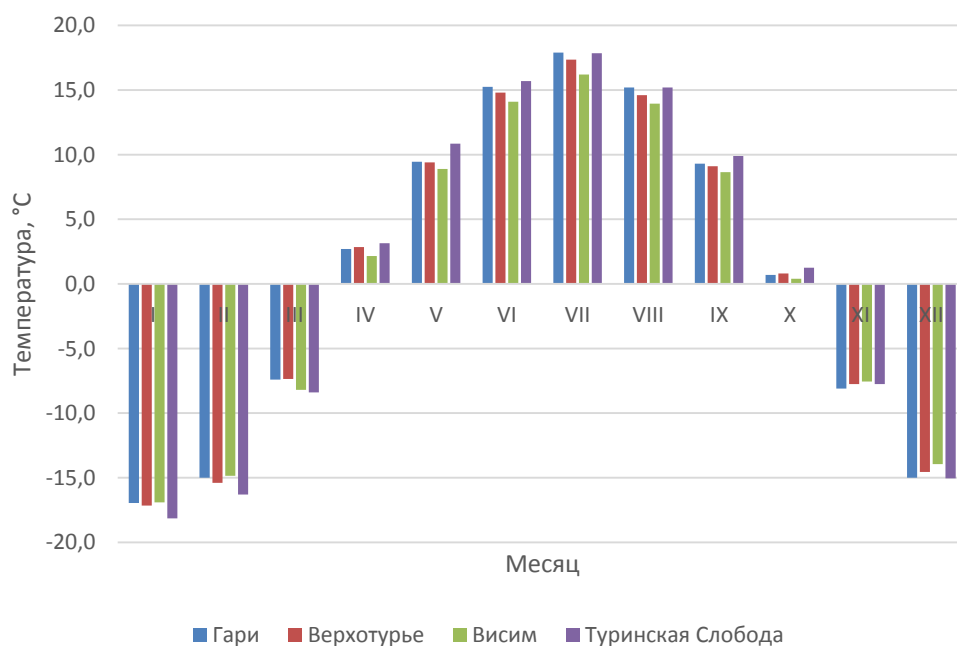


Рис. 6. Средняя температура воздуха

Вместе с тем самые низкие их значения отслеживаются в зимние месяцы (декабрь и февраль), а средняя минимальная температура составляет порядка минус 20°C ÷ минус 23°C . Следовательно, можно сделать вывод о том, что над указанным районом у поверхности земли в период с ноября по март (и в особенности зимой) отслеживается температурный режим, благоприятный для производства искусственных туманов кристаллической структуры.

В летние месяцы и в большую часть межсезонья вполне вероятно производство теплых жидкокапельных туманов.

Образование искусственных туманов, наряду с их температурным режимом, будет в существенной мере определяться также и значениями влажности воздуха. На рис. 7 представлены значения средней относительной влажности воздуха по месяцам над указанным районом.

Обзор приведенных на данном рисунке итогов показал, что влажностный режим над рассматриваемым районом является благоприятным для производства искусственных туманов, так как его значения характеризуются величинами в диапазоне 75–80%, за исключением весенних месяцев, когда под влиянием изменения радиационного равновесия эти значения понижаются до 60–65%. Вследствие этого в представленный период года проведение мероприятий по производству искусственных туманов будет связано с дополнительными техническими и материальными затратами.

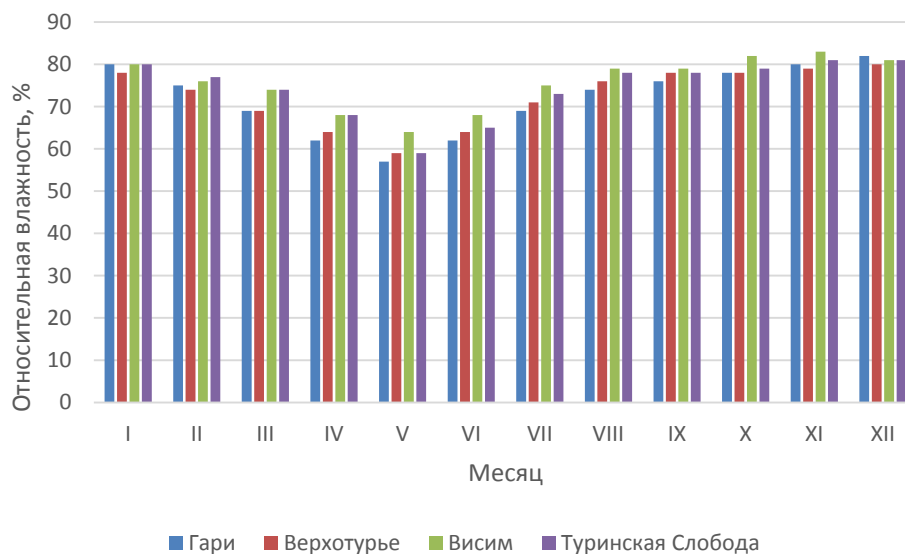


Рис. 7. Средняя относительная влажность воздуха

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обработки материалов, содержащихся в базе данных ВНИИГМИ-МЦД, в работе представлена модель метеорологических условий, включающая в себя температурно-влажностный и ветровой режимы, а также сведения о повторяемости естественных туманов и характеристику синоптических ситуаций и атмосферных условий у поверхности земли. Представленная модель разработана применительно к проблеме создания искусственных туманов в восточной части Среднего Урала в интересах решения экологических задач.

Показано, что наиболее подходящими типами синоптических процессов для создания искусственных туманов являются западные циклоны, проходящие вдоль 62-й параллели с. ш., западная периферия антициклонов, а также малоградиентное барическое поле.

Выявлены метеорологические условия, необходимые для образования туманов естественного и искусственного происхождения.

Предложенный в работе методологический подход к разработке модели пространственно-временного распределения метеорологических условий в районе Среднего Урала применительно к проблеме создания искусственных туманов в целях решения экологических задач, по мнению авторов, может быть также использован при планировании, организации и проведении работ по созданию таких атмосферных образований с целью решения экологических задач и в других регионах России.

Список используемых источников

1. Метод очищения воздушных бассейнов крупных городов от загрязняющих примесей путем вызывания искусственных осадков из переохлажденных фронтальных слоистообразных облаков / А. П. Доронин [и др.] // Сборник научных трудов участников межвузовского научного семинара «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства». 7 апреля 2017 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Военный институт Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хруничева. – 2017.

2. Искусственные облака и туманы как перспективное средство решения хозяйственных и экологических задач / А. П. Доронин [и др.] // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: сб. науч. тр.: в 2 ч. – Уфа.: АЭТЕРНА, 2017. – Ч. 2. – С. 141–149.

3. Доронин А. П. Метод локализации выбросов вредных веществ в местах крупных аварий и пожаров в населенных пунктах с помощью искусственных облаков и туманов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 194–198.

4. Специализированные массивы: [сайт] / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2002. – URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 10.10.2021). – Доступ для зарегистрированных пользователей.

5. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 778 с.

А. С. Иманова*;

С. П. Смышляев**;

доктор физико-математических наук, профессор

*Лаборатория «Исследований Озонового слоя и Верхней Атмосферы»;
Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург.

**Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНОВЫХ АНОМАЛИЙ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ

Приводится анализ межгодовой изменчивости общего содержания озона в Антарктическом и Арктическом регионах за период с 1980 по 2020 г. Были рассчитаны линейные тренды по трем периодам: с 1980 по 2020 г., с 1980 по 1999 г. и с 2000 по 2020 г. Исследовано влияние меридионального ветра на границе полярной области как характеристики остаточной циркуляции на циркумполярный вихрь. Оценено его влияние на изменение общего содержания озона. Анализ проводится на основе данных спутниковых измерений и атмосферного реанализа MERRA-2. В ходе исследования удалось установить, что изменчивость меридионального ветра на границе полярной области может служить индикатором внешнего воздействия на циркумполярный вихрь. Установлено, что меридиональный ветер обуславливает обмен воздухом между широтами, его скорость определяет степень изолированности полярного воздуха, которая является ключевым динамическим фактором, определяющим содержание озона в атмосфере полярных районов в зимне-весенний период.

Ключевые слова: общее содержание озона, циркумполярный вихрь, Арктика, Антарктика, данные реанализа, спутниковые данные

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферный озон – газ, который защищает Землю от губительного воздействия ультрафиолетового излучения Солнца. Увеличение уровня такого излучения может нежелательно повлиять на биосферу, например увеличить число иммунных заболеваний, заболеваний кожи (рак кожи) и глаз (катаракта) [1].

С начала 1980-х гг., когда впервые было обнаружено истощение озонового слоя в стратосфере Антарктики [2], за озоновой дырой в Антарктиде ведется постоянный мониторинг, в том числе аэрокосмический. Несмотря на то, что результаты аэрокосмического мониторинга обнаруживают следы начала восстановления озонового слоя [3], ситуация в полярных районах продолжает вызывать беспокойство [4, 5]. Особенно это касается Арктического региона. В 2011 и 2020 гг. было зафиксировано появление озоновых аномалий с рекордно низким содержанием озона. Причем процессы их образования были похожи на процессы образования антарктических озоновых дыр [6, 7], что заставляет предположить, что в Арктике при таких же условиях могут проявиться озоновые аномалии по своим масштабам подобные антарктическим. Если такое произойдет, то это не лучшим образом повлияет на большую часть населения. В Антарктике за последние 20 лет зафиксированы два случая положительной озоновой аномалии (в 2002 и 2019 гг.), совершенно не типичной для данного региона в рассматриваемый период года [8, 9].

Такая резкая межгодовая изменчивость подтверждает необходимость более глубокого изучения механизма формирования озоновых аномалий в полярных регионах. Исследования причин образования озоновых дыр в Антарктиде и Арктике имеют большое значение для человечества. Появление отрицательных озоновых аномалий в крупных масштабах может повлиять на изменение циркуляции атмосферы воздуха, изменение приземной температуры, а также на таяние льдов [1].

Формирование озоновой аномалии начинается с момента образования циркумполярного вихря в начале зимы. Он образуется в результате увеличения меридионального температурного градиента, приводящего к увеличению термического ветра, который проявляется в ускорении зональных ветров по направлению к полярной области. Затем они под действием силы Кориолиса образуют вихрь на границе средних и полярных широт (примерно 60°). Вихрь изолирует полярный воздух [10]. Внутри вихря наблюдаются низкие температуры, которые приводят к формированию полярных стратосферных облаков (ПСО), для образования которых требуются температуры ниже 200 К [11]. Активация хлорных и бромных газов на поверхности ПСО происходит в течение полярной ночи. По окончании полярной ночи высвобождается большое количество галогенных радикалов, которые вступают в каталитический цикл разрушения озона [12].

Содержание хлорных и бромных малых газовых составляющих в стратосфере остается в последнее время стабильным [13], поэтому основной причиной межгодовой изменчивости процессов формирования озоновых аномалий можно считать динамические факторы.

Изоляция полярного вихря является ключевым фактором потери озона, так как богатый озоном воздух со средних широт не поступает в полярные. Значит, главным динамическим фактором образования озоновых дыр является устойчивость циркумполярного вихря. Устойчивость вихря определяется величиной скорости зонального ветра. На устойчивость циркумполярного вихря могут влиять локальные явления, в частности волновая активность на границе полярного вихря, которая ослабляет зональный поток. Кроме того, могут влиять явления, которые зарождаются в других районах земного шара и как остаточная циркуляция могут воздействовать на полярный вихрь, такие как внезапные стратосферные потепления (ВСП) [14], квазидвухлетние колебания (КДК) [15], Южное колебание и Эль-Ниньо [16].

Причиной различной устойчивости циркумполярного вихря в Северном и Южном полушарии может быть разная волновая активность на границе полярных и умеренных широт [17]. Активность планетарных волн Россби, распространяющихся вертикально, является основным фактором, способствующим разрушению арктического полярного вихря [18]. В результате взаимодействия с полярным вихрем распространяющиеся из тропосферы вертикальные потоки волновой активности в стратосфере разрушаются. Происходящее при этом сильное смещение или расщепление полярного вихря сопровождается ВСП [14], которые наблюдаются практически ежегодно над Арктическим регионом [19], а в Южном полушарии большое ВСП регистрировалось лишь единожды, в сентябре 2002 г. [20]. Так как в Южном полушарии на границе полярных и умеренных широт в основном находится водная поверхность, а в Северном полушарии – материковая часть, орографические стационарные планетарные волны, распространяющиеся из тропосферы в стратосферу, в Антарктическом регионе слабее, чем в Арктике [15]. В результате этого планетарные волны в Южном полушарии имеют малые амплитуды и оказывают слабое воздействие на средний поток, в результате чего в стратосфере зональная скорость мало меняется во времени. Основным перенос массы и тепла осуществляется вокруг полюса, и обмена между умеренными и полярными широтами не происходит [21]. Для зимы Северного полушария характерна высокая волновая активность. Планетарные волны, распространяющиеся из тропосферы, воздействуют на средний поток в стратосфере, нарушают стабильность зонального переноса вокруг полюса, что приводит к разрушению или делению циркумполярного вихря [22].

Продолжительность полярной озоновой аномалии зависит от фазы квазидвухлетнего колебания (КДК), которое определяет расположение субтропической критической линии ветра (линия, где среднезональное значение скорости ветра переходит через 0), влияющее на распространение планетарных волн в стратосферу. Во время западной фазы колебания наблюдается усиление полярного вихря, а во время восточной – его ослабление, что проявляется в продолжительности и интенсивности разрушения озона [23].

В период с октября по ноябрь антарктический полярный вихрь становится подверженным влиянию субтропической стратосферы и более чувствительным к вариациям ее температуры.

Повышение температуры нижней субтропической стратосферы может привести к увеличению меридионального температурного градиента и последующему усилению антарктического полярного вихря. Сильное Эль-Ниньо, как например в 2015 г., способно приводить к увеличению температуры нижней тропической стратосферы, в частности, благодаря увеличению количества водяного пара в нижней стратосфере [24, 25].

Учет внешнего воздействия на полярный вихрь важен для улучшения понимания механизма ослабления или усиления полярного вихря. Поскольку полярные вихри являются элементами циркуляции и определяют степень влияния атмосферы средних широт на полярную атмосферу, а также определяют масштабы, интенсивность и продолжительность разрушения озона над полярной областью, то исследование причин, последствий и особенностей аномальной динамики полярных вихрей (в частности, под влиянием внешнего воздействия) является актуальной задачей. Характеристикой такого внешнего воздействия можно считать скорость меридионального ветра на границе полярного вихря.

Целью данной работы являются:

- 1) анализ изменения общего содержания озона (ОСО) в полярных регионах за период с 1980 по 2020 г.;
- 2) исследование влияния меридионального ветра на циркумполярный вихрь;
- 3) анализ этого влияния на изменчивость общего содержания озона;
- 4) сравнение процессов в Арктике и Антарктике.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе анализ изменения ОСО в полярных районах проводился на основе данных прибора *Solar Backscatter UV (SBUV)*, установленного на спутнике *Nimbus-7*, запущенном в октябре 1978 г., который обеспечивает глобальные измерения ОСО. Приборы SBUV осуществляют надирные измерения спектров отраженной и рассеянной солнечной радиации в области 250–340 нм при горизонтальном разрешении примерно 200×200 км. Описание прибора, алгоритмов интерпретации и анализ погрешностей измерений можно найти в работе [26].

Для исследования устойчивости циркумполярного вихря использовались данные реанализа MERRA-2 (*Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2*). Основными источниками спутниковых измерений в MERRA-2 являются данные приборов, осуществляющих измерения солнечного излучения – *Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer (SBUV)* и *Ozone Monitoring Instrument (OMI)*, а также собственного уходящего излучения – *Microwave Limb Sounder (MLS)*. Так как в течение полярной ночи измерения солнечного излучения отсутствуют, использование приборов уходящего излучения особенно важно для исследования полярных районов. Большое число параметров реанализа, интегрированных в массив MERRA, обеспечивают хорошую базу для изучения изменчивости климата. Данные MERRA схожи с другими глобальными массивами реанализа, но с несколькими ключевыми преимуществами, такими как более высокое разрешение по времени и по пространству, чем у аналогов. Данные ассимилированы в регулярную горизонтальную сетку с разрешением $1,25$ на $1,25^\circ$ градуса по широте и долготе на 42 вертикальных уровня в изобарической системе координат от 1000 до 1 гПа [27]. MERRA-2 широко использовался для изучения тенденций и процессов, связанных с озоном [28].

Для исследования зависимости устойчивости циркумполярного вихря под влиянием изменения меридиональной составляющей вихря были использованы данные о зональной и меридиональной компонентах ветра, а также данные об ОСО и температуре. Компоненты ветра – это векторы ветра восточного и северного направления, которые представлены переменными «U» и «V» соответственно. Компонент ветра U параллелен оси x (т. е. долготе). Положительный U-ветер дует с запада, а отрицательный U-ветер – с востока. Компонент

ветра V параллелен оси y (т. е. широте). Положительный ветер V приходит с юга, а отрицательный ветер V – с севера. Таким образом, компонент ветра U – это зональная составляющая полярного вихря, а компонент ветра V – меридиональная составляющая. Эти компоненты рассматривались на 60-м градусе южной и северной широты, которые являются примерными границами полярного вихря. Для данной задачи важна величина обмена воздухом между полярными и средними широтами, поэтому скорость меридионального ветра учитывалась по ее абсолютному значению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены результаты спутниковых измерений (SBUV) значения ОСО для Антарктического региона, осредненные для 3 месяцев – сентября, октября, ноября и Арктического региона, осредненные для 4 месяцев – январь, февраль, март, апрель за период 1980–2020 гг. Для этих данных приведены линейные тренды за весь исследуемый период, а также отдельно для периодов: с 1980 по 1999 г. и с 2000 по 2020 г.

Как видно из рисунка, в Антарктике за весь исследуемый период значимый тренд ОСО является отрицательным с уровнем значимости 1% и коэффициентом линейного тренда около -1 ЕД в год. В Арктике – также отрицательный с уровнем значимости почти 1% и коэффициентом линейного тренда -0,5 ЕД в год.

За период с 1980 по 1999 г. значимый тренд ОСО также отрицательный на обоих полюсах, в Антарктике с уровнем значимости 1% и коэффициентом линейного тренда около -3,95 ЕД в год, в Арктике – с уровнем значимости почти 1% и коэффициентом линейного тренда около -2,25 ЕД в год. За период с 2000 по 2020 г. в Антарктике тренд хоть и положительный, но малозначимый с уровнем значимости 90% и коэффициентом линейного тренда 0,14 ЕД в год. Короткопериодная изменчивость показывает повышенное содержания озона в 2002 и 2019 гг., что не характерно для данного региона в этот период года, а также большие амплитуды колебаний по сравнению с наблюдавшимися в период с 1980–1999 гг. К тому же в этот период участились случаи, когда значения ОСО были ниже чем за период с 1980 по 1999 г. (2005, 2015). В Арктике за период с 2000 по 2020 г. значимый тренд отрицательный с уровнем значимости 27% и коэффициентом линейного тренда около -0,72 ЕД в год. В 2020 г. значения ОСО были самыми низкими за весь исследуемый период.

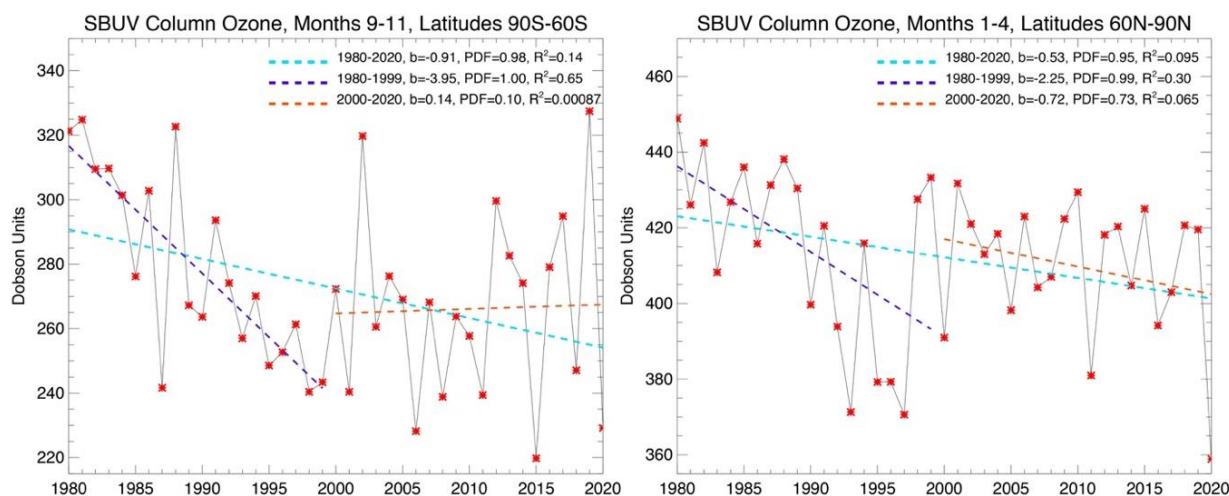


Рис. 1. Значения ОСО для Антарктического и Арктического регионов, по данным спутниковых измерений SBUV за период 1980–2020 гг.

Чтобы понять механизм влияния меридионального ветра на циркумполярный вихрь, был проведен анализ изменения исследуемых параметров за 40 лет (1980–2020). В данной работе представлены ситуации для Антарктического и Арктического регионов в года, когда складывалась характерная ситуация в этот период года и не характерная.

На рис. 2 показаны ежедневные изменения исследуемых параметров в атмосфере Антарктиды в 2006 и 2019 гг. В 2006 г. в атмосфере Антарктиды сформировалась «типичная» для последних лет ситуация, когда ОСО достигает довольно низких значений (среднее за сентябрь – 180 ЕД). Прежде всего это связано с устойчивым циркумполярным вихрем. На протяжении всего зимнего периода мы наблюдаем высокие значения средней скорости зонального ветра (50–70 м/с на уровне 30 гПа) и низкие значения температуры (ниже 190 К на уровне 30 гПа). Низкие температуры приводят к формированию ПСО, на поверхностях которых хлорные компоненты накапливаются в нестойких к солнечному облучению резервуарах, а после возвращения Солнца превращаются в более реактивные и каталитически разрушают озон [29]. В результате этого происходит снижение ОСО. Средняя скорость меридионального ветра в августе и до середины сентября небольшая и не способна нарушить изоляцию вихря. Усиление меридионального ветра в середине сентября до 20 м/с лишь немного ослабляет изоляцию вихря, и отмечается небольшое увеличение ОСО и температуры в этот момент. Однако к концу сентября мы наблюдаем усиление меридионального ветра до 25 м/с и одновременное ослабление зональной скорости до 50 м/с. В результате устойчивость вихря нарушается, и происходит постепенное его разрушение. Температура начинает расти, ПСО рассеиваются. Богатый озоном воздух со средних широт поступает в полярные широты, и значения ОСО постепенно увеличиваются.

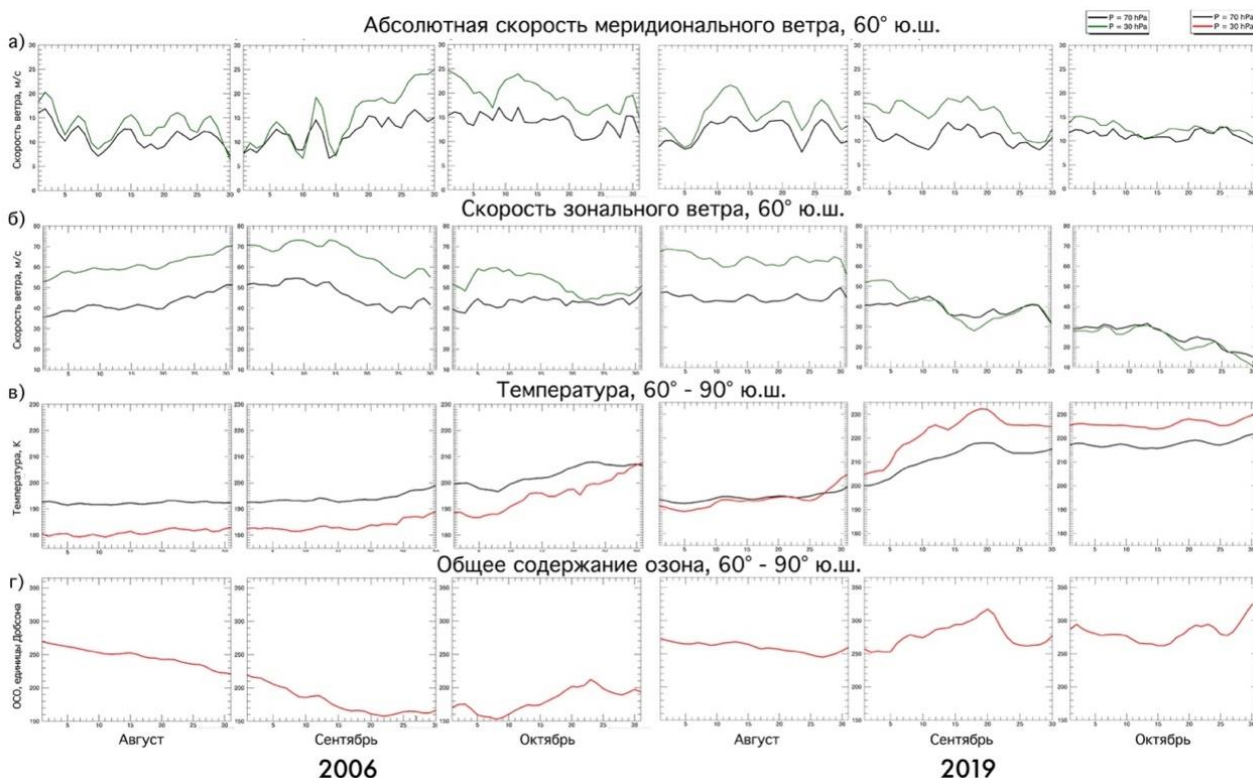


Рис. 2. Атмосфера Антарктиды в 2006 и 2019 гг. в августе, сентябре, октябре:
 а – абсолютная скорость меридионального ветра на уровнях давления 70 и 30 гПа;
 б – скорость зонального ветра на уровнях давления 70 и 30 гПа;
 в – температура на уровнях давления 70 и 30 гПа на широтах 60–90° ю. ш.;
 г – общее содержания озона на широтах 60–90° ю. ш.

В 2019 г. в Антарктиде была зафиксирована положительная озоновая аномалия, совершенно нетипичная для данного региона. В этот год циркумполярный вихрь полностью разрушился к концу октября, что на месяц раньше, чем в среднем за 40 лет, хотя, как правило, разрушение вихря в Антарктиде происходит в ноябре–декабре. Аномальное ослабление антарктического полярного вихря весной 2019 г. происходило в результате проникновения в нижнюю стратосферу вертикально распространяющихся планетарных волн [30]. В сентябре наблюдались стремительное уменьшение скорости зонального ветра на 60° ю. ш. и высокие значения скорости меридионального ветра, что привело к усиленному обмену воздухом между широтами – происходит постепенный рост температуры и постепенный рост ОСО.

На рис. 3 показаны ежедневные изменения параметров атмосферы Арктики в 2018 и 2020 гг. для трех месяцев: февраль, март, апрель. В 2018 г., в начале февраля, скорость зонального ветра довольно высокая, что приводит к формированию условий разрушения озона. В условиях изоляции температура понижается до 200 К и образуются ПСО, на поверхностях которых формы хлора превращаются в более реактивные и каталитически разрушают озон. Об этом свидетельствует понижение ОСО в начале февраля. Но резкое увеличение скорости меридионального ветра и одновременное уменьшение скорости зонального ветра приводят к нарушению устойчивости полярного вихря. Вихрь постепенно разрушается, и обмен воздухом между широтами способствует повышению температуры и ОСО. Такая ситуация характерна для данного региона и наблюдается почти каждый год.

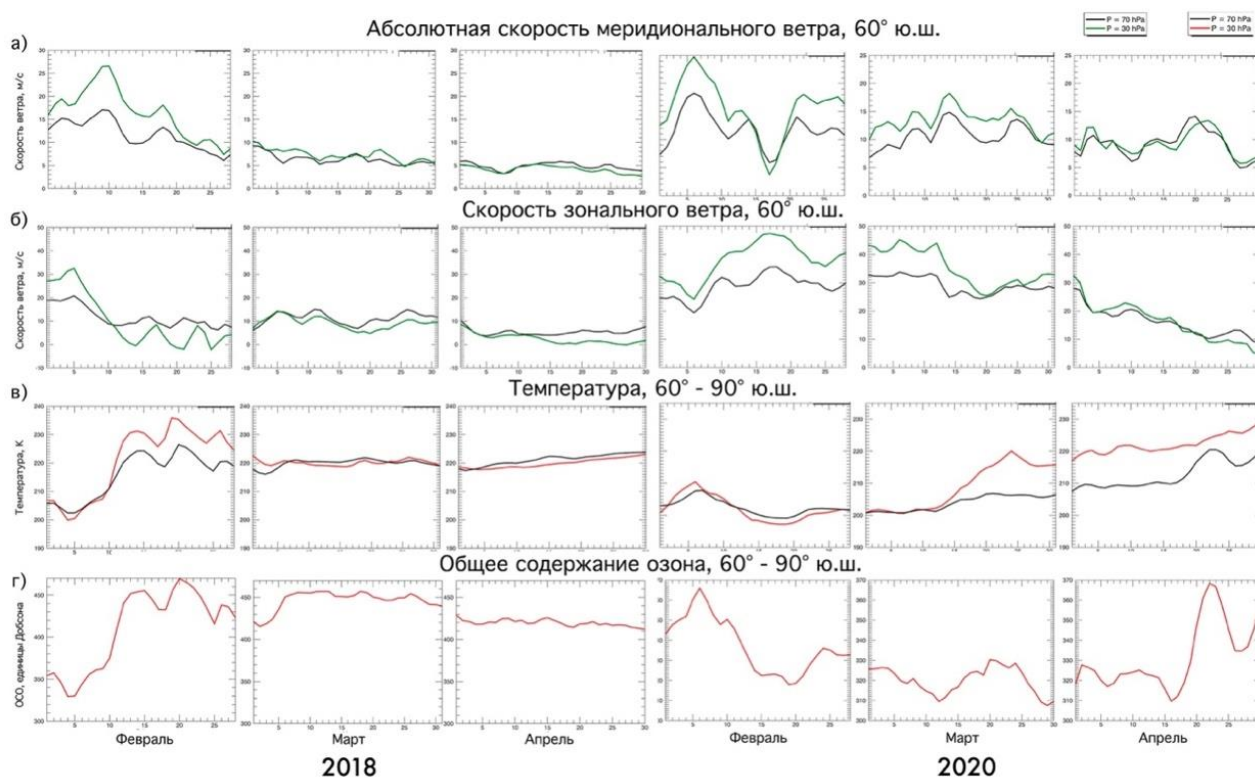


Рис. 3. Атмосфера Арктики в 2018 и 2020 гг., в феврале, марте, апреле:
 а – абсолютная скорость меридионального ветра на уровнях давления 70 и 30 гПа;
 б – скорость зонального ветра на уровнях давления 70 и 30 гПа;
 в – температура на уровнях давления 70 и 30 гПа на широтах 60–90° с. ш.;
 г – общее содержания озона на широтах 60–90° с. ш.

Однако в 2020 г. в Арктике была зафиксирована озоновая дыра рекордных размеров. Среднемесячные значения ОСО в марте 2020 г. составляло 320 DU и является минимумом за последние 40 лет. В этом году в Арктике образовался устойчивый циркумполярный вихрь, и

даже порывы меридионального ветра в начале февраля не смогли повлиять на его устойчивость. Скорость зонального ветра ослабла лишь на несколько дней. Слабый меридиональный ветер привел к изолированности воздуха и снижению температуры до 200 К. Значения ОСО начинают быстро уменьшаться. Дальнейшие порывы меридионального ветра приводят к незначительному увеличению ОСО за счет притока воздуха со средних широт, но высокая зональная скорость не позволяет температуре увеличиться, и реакции, протекающие на поверхности ПСО, продолжают разрушать озон. Порывы меридионального ветра и ослабление зональной скорости с середины марта приводят к началу разрушения полярного вихря к началу апреля. Температура повышается, реакции, разрушающие озон, прекращаются, что приводит к увеличению ОСО в конце апреля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных спутниковых измерений проведен анализ изменения общего содержания озона в полярных регионах за период с 1980 по 2020 г. В этот период наблюдается резкая межгодовая изменчивость, с большими амплитудами колебаний из года в год, которая подтверждает необходимость дальнейшего изучения механизма образования озоновых аномалий.

В результате анализа динамических условий в атмосфере полярных районов за период с 1980 по 2021 г., по данным реанализа MERRA-2, удалось установить изменчивость меридионального ветра как характеристики остаточной циркуляции на границе полярной области, которая может служить индикатором внешнего воздействия на циркумполярный вихрь.

Меридиональный ветер обуславливает обмен воздухом между широтами, его скорость определяет степень изолированности полярного воздуха, которая является ключевым динамическим фактором, определяющим содержание озона в атмосфере полярных районов.

Для Антарктики характерны низкие значения меридионального ветра на протяжении всего зимнего периода, которые не оказывают воздействие на полярный вихрь до ноября–декабря, а для Арктики характерны высокие значения меридионального ветра, которые способствуют разрушению вихря в феврале–марте.

Список используемых источников

1. Озонный щит Земли и его изменения / Э. Л. Александров [и др.]. – СПб.: Гидрометеопиздат, 1992. – 288 с.
2. On the depletion of Antarctic ozone / S. Solomon [et al.] // *Nature*. – 1986. – Vol. 321. – P. 755–758.
3. World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report. – Geneva, 2014. – № 55. – 416 p.
4. *Смышляев С. П., Блакитная П. А., Моцаков М. А.* Численное моделирование влияния физических и химических факторов на межгодовую изменчивость содержания озона в Антарктике // *Метеорология и гидрология*. – 2020. – № 3. – С. 21–32.
5. *Bodeker G. E. and Kremser S.* Indicators of Antarctic ozone depletion: 1979 to 2019, *Atmos // Chem. Phys.* – 2021. – P. 5289–5300. – URL: <https://doi.org/10.5194/acp-21-5289-2021> (дата обращения: 24.03.2022).
6. World Meteorological Organization (WMO), Record stratospheric ozone loss in the arctic in spring of 2011. – 2011. – Press Release Number № 912. – URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/no-912-record-stratospheric-ozone-loss-arctic-spring-of-2011> (дата обращения: 24.03.2022).

7. World Meteorological Organization (WMO), Arctic ozone depletion reached record level. – 2020. – URL: <https://public.wmo.int/en/media/news/arctic-ozone-depletion-reached-record-level> (дата обращения: 23.03.2022).
8. *Newman P. A., Nash E. R.* The unusual Southern Hemisphere stratosphere winter of 2002 // *J. Atmos. Sci.* – 2005. – Vol. 62, № 3. – P. 614–628.
9. Antarctic ozone enhancement during the 2019 sudden stratospheric warming event / S. Saifeddine [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2020. – Vol. 47, № 14. – P. e2020GL087810.
10. *Harvey V.L., Pierce R.B., Hitchman M.H.* A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, № D20. – P. 4442. – DOI:10.1029/2001JD001471.
11. *Hamil P., Toon O.B.* Polar stratospheric clouds and the ozone hole // *Physics today.* – 1991. – Vol. 44, № 12. – P. 34–42.
12. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов / С. П. Смышляев [и др.] // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 1–15.
13. A new formulation of equivalent effective stratospheric chlorine (EESC) / P.A. Newman [et al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2007. – Vol. 7. – P. 4537–4552.
14. *Погорельцев А. И., Савенкова Е. Н., Перцев Н. Н.* Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2014. – Т. 54, № 3. – С. 387–403.
15. *Shindell D.T., Wong S., Rind D.* Interannual variability of the Antarctic ozone hole in a GCM. Part 1: The influence of tropospheric wave variability // *J. Atmos. Sci.* – 1997. – Vol. 54, № 18. – P. 2308–2319.
16. Hurwitz Temperature trends in the tropical upper troposphere and lower stratosphere: Connections with sea surface temperatures and implications for water vapor and ozone / C.I. Garfinkel [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2013. – Vol. 118, № 17. – P. 9658–9672.
17. On the «downward control» of extratropical diabatic circulations by eddy induced mean zonal forces / P.H. Haynes [et al.] // *J. Atmos. Sci.* – 1991. – Vol. 48, № 4. – P. 651–678.
18. Vortex Rossby waves on smooth circular vortices: Part I. Theory / G. Brunet [et al.] // *Dynam. Atmos. Oceans.* – 2002. – Vol. 35, № 2. – P. 153–177.
19. Статистическая неравномерность дат внезапных стратосферных потеплений в зимнем Северном полушарии / Е. Н. Савенкова [и др.] // *Известия РАН, ФАО.* – 2017. – № 3. – С. 287–295.
20. A possible influence of equatorial winds on the September 2002 Southern Hemisphere sudden warming event / L. Gray [et al.] // *J. Atmos. Sci.* – 2005. – Vol. 62, № 3. – P. 651–667.
21. *Newman P.A., Nash E.R., Rosenfield J.E.* What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring? // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106, № D17. – DOI:10.1029/2000JD000061.
22. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов / С. П. Смышляев [и др.] // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 102–116.
23. *Holton, J.R., Tan H.C.* The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb // *J. Atmos. Sci.* – 1980. – Vol. 37, № 10. – P. 2200–2208.
24. *Дробашевская Е. А., Погорельцев А. И., Смышляев С. П.* Реакция внетропической стратосферы на события Эль-Ниньо Южного колебания во время весенней перестройки циркуляции // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2018. – Вып. 662. – С. 33–36.
25. *Яковлев А. Р., Смышляев С. П.* Численное моделирование глобального воздействия океана и явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья на структуру и состав атмосферы // *Ученые записки РГГМУ.* – 2017. – № 49. – С. 58–72.
26. Solar Backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm / P. K. Bhartia [et al.] // *Atmos. Meas. Tech.* – 2013. – Vol. 6. – P. 2533–2548. – URL: <https://doi.org/10.5194/amt-6-2533-2013> (дата обращения: 23.03.2022).

27. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications / M.M. Rienecker [et al.] // *J. Climate*. – 2011. – Vol. 14. – P. 3624—3648. – DOI:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
28. Recent decline in lower stratospheric ozone attributed to circulation changes *Geophys* / K. Wargan [et al.] // *Res. Lett.* – 2018. – Vol. 45, № 10. – P. 5166–5176.
29. Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов / С. П. Смышляев [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 291–306.
30. Antarctic polar vortex weakening due to a temperature decrease in the lower subtropical stratosphere / V. V. Zuev [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2020. – Vol. 11560. – P. 115607U.

А. Х. Кагермазов*,

кандидат физико-математических наук;

Л. Т. Созаева*,

кандидат физико-математических наук, доцент

*Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

ПРОГНОЗ ГРАДА И ОЦЕНКА ЕГО РАЗМЕРА НА ОСНОВЕ ГЛОБАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ

С использованием методов статистического анализа составлен прогноз града и определен его максимальный размер. Для расчета параметров атмосферы, вместо данных реального аэрологического зондирования, применена прогностическая продукция глобальной модели атмосферы GFS NCEP с заблаговременностью 24 ч. Исследования проведены для метеостанции «Минеральные воды» Центральной части Северного Кавказа. Показатели качества и успешности предлагаемого прогноза града оказались высокими. Параметры, характеризующие качество, статистическую значимость и практическую применимость регрессионной модели, оценки размера града также показали возможность их применения при прогнозировании максимального диаметра града.

Ключевые слова: глобальная модель атмосферы, прогноз града, аэрологическое зондирование, конвекция, метеорологические параметры.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее опасные явления погоды, в том числе и градобития, связаны с атмосферной конвекцией, а именно с возникновением в жаркие дни мощных восходящих потоков за счет неравномерного прогрева подстилающей поверхности, а на территории Северного Кавказа еще и с горно-долинной циркуляцией воздуха. Ежегодно градобития приносят большие потери посевам и насаждениям, иногда полностью уничтожая их [4, 6]. Вместе с тем град – очень сложное событие для предсказания, обусловленное недостатком исходной информации. Недостаток входной информации вызван тем, что для прогнозирования града необходимо иметь данные аэрологического зондирования. В нашей стране аэрологическое зондирование атмосферы проводится в пунктах, находящихся на большом расстоянии друг от друга, причем интервал проведения измерений довольно большой и отличается от момента максимального развития конвективных процессов. В настоящее время предлагаются глобальные модели атмосферы, которые выдают информацию, заменяющую данные фактического аэрологического зондирования.

Проблема усугубляется еще и тем, что натурные исследования для определения взаимосвязи микрофизических характеристик града, в частности размера града, а также площади, поврежденной градом, с параметрами атмосферы проводятся недостаточно или не проводятся совсем.

Работа посвящена актуальной задаче – прогнозу града и оценке его максимального размера. Для решения этой задачи исследуются особенности параметров атмосферы при наличии конвективных явлений в районе пункта аэрологического зондирования атмосферы «Минеральные Воды» Центрального региона Северного Кавказа. Входной информацией являются фактические данные о конвективных явлениях и модельные данные о стратификации атмосферы, получаемые из глобальной системы прогнозирования NOAA (GFS NCEP), которая представляет собой аналог аэрологического зонда и имеет достаточную точность [2, 3, 7].

Для данного исследования привлекалась программа для статистического анализа данных SPSS [1], в которой реализованы множественный линейный регрессионный и факторный анализы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходными данными для настоящего исследования являются прогностические параметры атмосферы:

- изобарические поверхности, гПа;
- высоты, соответствующие изобарическим поверхностям, м;
- температура окружающего воздуха, °С;
- температура точки росы, °С;
- направление ветра, в градусах;
- скорость ветра, м/с.

Они предоставляются потребителю в оперативном режиме через каждые 6 ч по исходным срокам 0, 6, 12, 18 ч ВСВ (Всемирное скоординированное время). Время счета составляет 12 мин для заблаговременности 24 ч.

Для прогноза града и оценки наибольшего его размера в качестве входных данных используется прогностическая информация из математической модели атмосферы с заблаговременностью 24 ч: температуры воздуха и точки росы, направление и скорость ветра на стандартных уровнях (Земля, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300 и 200 гПа). А также фактическая информация о датах развития конвективных явлений (с фактом выпадения града и без) по данным наблюдений военизированных служб по борьбе с градом, находящихся в зоне репрезентативности реальных данных аэрологического зондирования станции «Минеральные воды» Северного Кавказа.

Данные глобальной модели атмосферы позволяют рассчитывать комплекс параметров, известных из применяемых методов прогноза конвекции и вызванных ею опасных погодных явлений, определяющих возможность возникновения и развития градовых процессов в атмосфере. Из комплекса параметров, для облегчения вычислительной процедуры, были отобраны наиболее информативные из них. Для этого привлекался бисериальный коэффициент корреляции, позволивший уменьшить количество параметров атмосферы до двенадцати [5]:

- наибольшая разность температур в облаке и окружающем воздухе, *DTM*;
- уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе больше всего, *HM*;
- вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 4–4,5 км, *DTK*;
- суммарная удельная влажность в слое «Земля – 5 км», *SQZ5*;
- средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км, *TDSR5*;
- уровень конвекции, *PH1*;
- температура на уровне конвекции, *TH1*;
- индекс неустойчивости Джорджа, *DJ*;
- индекс интегральной суммы Миллера, *TTMI*;
- энергетическая характеристика подоблачного слоя, *DSS*;
- вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 2 км, *DT1*;
- суммарная удельная влажность в слое «Земля 850–500 гПа», *SDτ*.

Затем по этим параметрам строится дискриминантная функция для прогноза града по следующей схеме:

- осуществляется разделение событий на «град» и «не град»;
- рассчитываются средние значения параметров атмосферы в каждой из групп и объединенная матрица рассеивания для общей группы;
- рассчитываются обратная объединенная матрица рассеивания и ее определитель;
- для общей группы вычисляются: средние, обобщенная статистика Махаланобиса;

– для каждого события в каждой группе строятся дискриминантные функции. По значению вероятности, связанной с наибольшим значением дискриминантной функции, выбираются события «град» или «не град».

По этой схеме была получена дискриминантная функция [5]:

$$L = \text{const} + aV_{700} + bDTM + cDT1 + dSQZ5 + eSD\tau + fDJ, \quad (1)$$

где a, b, c, d, e, f – коэффициенты;
 const – свободный член;
 V_{700} – упорядоченные вертикальные движения воздуха на уровне 700 гПа, выдаваемые самой глобальной моделью атмосферы;
 $DTM, DT1,$
 $SQZ5, SD\tau, DJ$ – параметры атмосферы, рассчитанные по данным модельного зонда.

Дискриминантная функция (1) дает возможность количественно учесть атмосферные движения синоптического масштаба (V_{700}), являющиеся фоном для развития конвективных явлений.

Отметим, что параметры, составляющие дискриминантную функцию, отражают запас конвективной неустойчивости, влагосодержания при данной стратификации метеоэлементов и температурные условия в зоне роста града.

Для выявления и описания зависимости между максимальным диаметром града D и параметрами атмосферы составлена регрессионная модель:

$$D = f(DTM, HM, DTK, SQZ5, TDSR5, PH1, TH1, DJ, TTMI, DSS) + \text{const}, \quad (2)$$

где $DTM, HM, DTK,$
 $SQZ5, TDSR5, PH1,$
 $TH1, DJ, TTMI, DSS$ – независимые коэффициенты (параметры атмосферы);
 const – свободный член.

Модель создается по следующей схеме:

- сначала проверяются на нормальность распределения параметры атмосферы и отсутствие мультиколлинеарности между ними;
- методом пошагового отбора наиболее значимых параметров атмосферы составляется уравнение модели;
- затем параметры модели проверяются на практическую применимость и статистическую значимость по предъявляемым к ним критериям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прогнозирование града и оценка его наибольшего размера проводились по данным наблюдений конвективных явлений за период с мая по август 2020 года. Для этих дат были выбраны метеопараметры атмосферы по выходным данным математической модели GFS для географических координат метеостанции «Минеральные воды».

Были проведены расчеты отобранных параметров атмосферы, с помощью которых получили дискриминантную функцию в виде

$$L = -12,5 - 0,05V_{700} + 0,3205DTM + 0,007DT1 + 0,00359SQZ5 - 0,03606SD\tau + 0,0389DJ, \quad (3)$$

где V_{700} – упорядоченные вертикальные движения воздуха на уровне 700 гПа;
 DTM – наибольшая, разность температур в облаке и окружающем воздухе;

- $TH1$ – вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 2 км;
 $SQZ5$ – массовая доля водяного пара в слое «Земля – 5 км»;
 DJ – индекс неустойчивости Джорджа;
 $SD\tau$ – суммарный дефицит точки росы в слое 850–500 гПа.

Дискриминантная функция (3) предсказывает при $L \geq 0$ «град», а если $L < 0$ – «не град». По результатам расчетов по этой функции была составлена таблица сопряженности (табл. 1). Данные таблицы были использованы для определения основных показателей качества и успешности прогнозов: оправдываемость прогноза (отсутствия и наличия явления и общая) и предупрежденность прогноза (отсутствия и наличия явления) (табл. 2).

Таблица 1

Таблица сопряженности

Прогноз явления	Наблюдение явления		Сумма
	«град»	«не град»	
«град»	26	7	33
«не град»	6	16	22
сумма	32	23	55

Таблица 2

Показатели качества прогноза града с заблаговременностью 24 ч

Наименование критериев качества прогноза	Значение критериев качества прогноза
Общая оправдываемость прогноза	77
Предупрежденность наличия явления	88
Оправдываемость прогноза наличия явления	80
Оправдываемость отсутствия явления	73
Предупрежденность отсутствия явления	70

Рассматриваемый метод, как показали результаты расчетов, соответствует известным критериям качества прогнозов. Из табл. 2 следует, что показатели успешности прогноза оказались высокими. Отметим, что оправдываемость рассматриваемого метода при заблаговременности 24 часа оказалась равной $\approx 77\%$, а предупрежденность наличия явления – $\approx 88\%$.

Для прогноза максимального размера привлекался регрессионный анализ, перед проведением которого значения предиктанта и предикторов проверялись на нормальность распределения, отличие дисперсии от нуля и отсутствие мультиколлинеарности между исследуемыми переменными. Распределения всех переменных оказались близки к нормальному. Условие неравенства дисперсии (квадрата стандартного отклонения) переменных нулю было соблюдено для всех переменных. Матрица корреляции Пирсона продемонстрировала отсутствие сильной связи между исследуемыми предикторами (мультиколлинеарности), не считая $RH1$ и HM , которые были исключены из дальнейшего анализа.

Известно, что регрессионная модель является надежной, если значение коэффициента Фишера $F > 1$ и уровень ее значимости $Sig.$ не больше 0,05 (5%). Методом пошагового исключения была выбрана модель, для которой $F > 6,536$, а $Sig. = 0,01 < 0,05$. Это свидетельствует, что включенные в уравнение регрессии коэффициенты значимы и соответствуют генеральной совокупности, а уравнение регрессии применимо для оценки наибольшего диаметра выпавшего града.

В таблице коэффициентов модели приведены значения показателей статистик толерантности (табл. 3). Значение показателя tol должно превышать 0,1, а значение фактора инфляции VIF должно быть меньше 10. В данном исследовании значение $tol < 0,72$, а $VIF < 5,501$, что еще раз подтверждает отсутствие эффекта мультиколлинеарности, и, следовательно, пригодности модели для дальнейшего использования.

Таблица 3

Коэффициенты регрессионной модели

Модель	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты, β	Критерий Стьюдента, t	Значимость, $Sig.$	95%-ный доверительный интервал для B		Статистики коллинеарности	
	B	стандартная ошибка				Нижняя граница	Верхняя граница	tol	VIF
Константа	-17,839	13,076		-1,364	0,185	-44,827	9,149	–	–
$TDSR5$	0,123	0,058	0,334	2,121	0,044	0,003	0,242	0,711	1,406
$TH1$	-0,056	0,023	-0,620	-2,428	0,023	-0,103	-0,008	0,270	3,702
DJ	0,123	0,040	0,673	3,041	0,006	0,039	0,206	0,361	2,774
$TTMI$	-0,097	0,041	-0,734	-2,356	0,027	-0,181	-0,012	0,182	5,501
DSS	0,006	0,002	0,540	3,464	0,002	0,002	0,009	0,725	1,379

В итоге была получена регрессионная модель оценки максимального размера града вида:

$$D = -17,839 + 0,123TDSR5 - 0,056TH1 + 0,123DJ - 0,097TTMI + 0,006DSS, \quad (4)$$

где $TDSR5$ – средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км;
 $TH1$ – температура на уровне конвекции;
 DJ – индекс неустойчивости Джорджа;
 $TTMI$ – индекс интегральной суммы Миллера;
 DSS – энергетическая характеристика подоблачного слоя.

В табл. 3 представлены значения константы, регрессионных нестандартизованных коэффициентов и уровень их статистической значимости ($Sig.$), который является результатом проверки нулевой гипотезы о равенстве каждого из них нулю с помощью критерия Стьюдента (t -тест). Переменные $TDSR5$, $TH1$, DJ , $TTMI$, DSS оказывают статистически значимое влияние на диаметр града D , так как для них $Sig. < 0,05$, т. е. нулевая гипотеза о равенстве регрессионных коэффициентов нулю отвергается при 5%-ном уровне значимости. Уровень значимости для константы ($const = -17,839$) равен $Sig. = 0,185 > 0,05$, т. е. константа в уравнении незначима и не подлежит интерпретации максимального размера града с точки зрения физики. Обычно, это бывает связано с тем, что переменные уравнения регрессии имеют разную размерность. В таких случаях обычно применяется z -стандартизация переменных.

Стандартизованные коэффициенты регрессии (β) дают возможность оценить в какой степени значение независимой переменной (наибольшего размера града) определяется значениями предикторов (параметров атмосферы), т. е. они определяют удельный вклад каждого параметра атмосферы в вариации характеристик интенсивности града (табл. 3). В рассматриваемом случае наибольшее влияние на значение диаметра града оказывает индекс интегральной суммы Миллера, который почти в 2 раза больше, чем средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км.

Стандартные ошибки показывают, что при доверительном интервале 95% каждый коэффициент может отклоняться от среднего значения на две стандартные ошибки. Доверитель-

ные интервалы для B (нижняя и верхняя границы) показывают в каких пределах с 95%-ной вероятностью находится значение коэффициента B .

Так как константа уравнения регрессии незначима, была применена z -стандартизация переменных и построена модель вида:

$$zD = 0,0 + 0,334 zTDSR5 - 0,620 zTH1 + 0,673 zDJ - 0,734 zTTMI + 0,54 zDSS, \quad (5)$$

где zD , $zTDSR5$, $zTH1$, zDJ , $zTTMI$, $zDSS$ – z -стандартизованные значения переменных D , $TDSR5$, $TH1$, DJ , $TTMI$, DSS .

Все коэффициенты уравнения модели значимые ($Sig. < 0,05$), а для константы – $Sig. < 1$, т. е. с вероятностью 100% константа уравнения модели равна нулю (табл. 4).

Таблица 4

Таблица коэффициентов регрессионных моделей

Модель	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты, $beta$	Критерий Стьюдента, t	Значимость, $Sig.$	95%-ный доверительный интервал для B		Статистики коллинеарности	
	B	стандартная ошибка				Нижняя граница	Верхняя граница	tol	VIF
Константа	0	0,131		0,000	1,000	-0,0270	0,270		
$zTDSR5$	0,334	0,157	0,334	2,121	0,044	0,009	0,659	0,711	1,406
$zTH1$	-0,620	0,256	-0,620	-2,428	0,023	-1,148	-0,093	0,270	3,702
zDJ	0,673	0,221	0,673	3,041	0,006	0,216	1,129	0,361	2,774
$zTTMI$	-0,734	0,312	-0,734	-2,356	0,027	-1,377	-0,091	0,182	5,501
$zDSS$	0,540	0,156	0,540	3,464	0,002	0,218	0,862	0,725	1,379

Таким образом, используя уравнение (5), можно по заданным значениям параметров атмосферы (независимых переменных) оценивать значение максимального диаметра града (зависимой переменной).

Параметры, характеризующие качество модели размещены в табл. 5.

Таблица 5

Общие сведения о модели

Коэффициент детерминации, R	R -квадрат	Скорректированный R -квадрат	Стандартная ошибка оценки	Тест Дарбина – Уотсона
0,759	0,577	0,488	0,60383	2,059
Предикторы: (конст) DSS , DJ , $TDSR5$, $TH1$, $TTMI$ Зависимая переменная: D				

Коэффициент множественной корреляции, определяющий тесноту связи между переменными в регрессионной модели, был равен $R = 0,76$ (табл. 5). Это указывает на высокую связь между максимальным диаметром града и параметрами атмосферы. Коэффициент детерминации, указывающий на качество модели и показывающий долю совокупной вариации зависимой переменной, которая описывается независимыми переменными, как правило, должен быть больше 0,5. Так как $R^2 = 0,58$, то предлагаемая модель считается адекватной, и 58% изменений максимального диаметра града определяется совместным изменением параметров атмосферы.

Качество модели оценивается еще и анализом остатков, т. е. отклонений наблюдаемых значений от теоретически ожидаемых. Условие независимости остатков между собой иссле-

дуются с помощью теста Дарбина – Уотсона на автокорреляцию. Для полученной модели оценки максимального диаметра града он оказался равным 2,084, что свидетельствует об отсутствии автокорреляции остатков. Остатки еще сравниваются с кривой нормального распределения. Хорошее согласие остатков с кривой нормального распределения продемонстрировано на гистограмме (рис. 1).

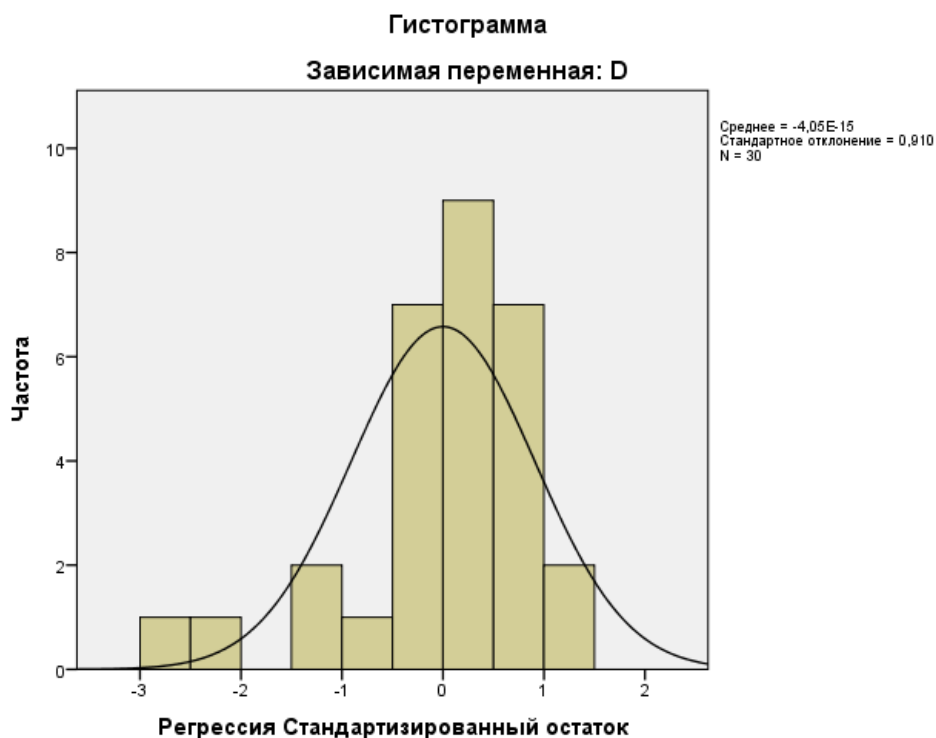


Рис. 1. Гистограмма распределения стандартизированных остатков с кривой нормального распределения

По результатам исследования был построен график отклонений наблюдаемых значений максимального размера града и их теоретически прогнозируемых значений с заблаговременностью 24 часа (рис. 2). Визуализация оценочных (прогнозируемых) и наблюдаемых (фактических) значений размера града продемонстрировало хорошее согласие. Что также доказывает возможность применения предлагаемой модели для оценки максимального диаметра града.

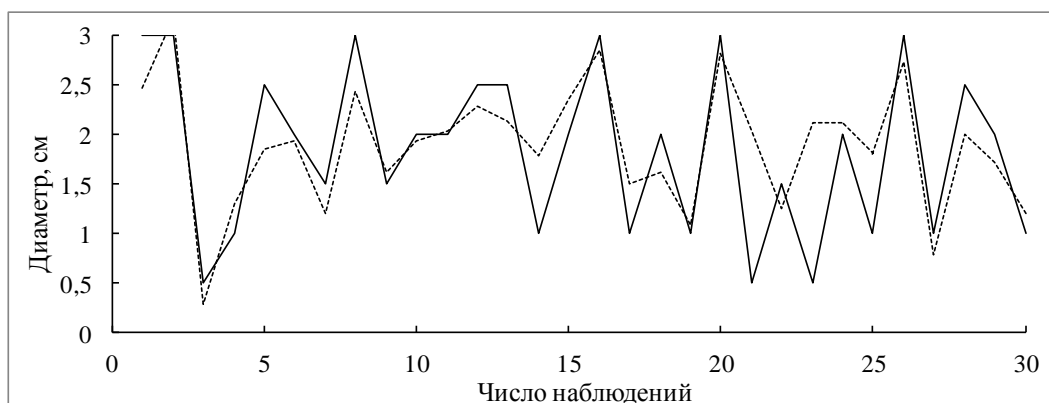


Рис. 2. Максимальный диаметр града:
сплошные кривые – фактические значения;
пунктирные кривые – прогнозируемые значения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Схемы прогнозирования града и оценки его наибольшего размера, основанные на использовании выходной продукции Глобальной системы прогнозов Национальных центров прогнозирования процессов в окружающей среде (GFS NCEP) США с заблаговременностью 24 часа, показали свою работоспособность, и, следовательно, возможность их использования на практике, в том числе и для регионов, где аэрологическое зондирование не проводится.

В дальнейшем, по мере накопления прогностических данных с нарастающей заблаговременностью выходных данных региональной модели для Северного Кавказа, которые соответствовали бы датам наблюдения града, будут уточняться модели прогноза града и его максимального размера для разных сроков.

Список используемых источников

1. Бююль А., Цёфель П. SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: пер. с нем. – СПб.: ДиаСофтЮП, 2005. – 608 с.
2. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2019 upgrade / T. Haiden [et al.] // ECMWF Technical Memorandum. – 2019. – № 853. – P. 1–54.
3. Global simulations of the atmosphere at 1.45 km grid-spacing with the integrated forecasting system / P. Dueben [et al.] // Journal of the Meteorological Society of Japan. – 2020. – Ser. II. – Vol. 98. – P. 551–557.
4. Dzombak B. Severe hailstorms are costly and hard to predict // Eos. – 2021. – № 102. – URL: <https://doi.org/10.1029/2021EO158268> (дата обращения: 16.04.2021).
5. Кагермазов А. Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений. – Нальчик: Печатный двор, 2015. – 215 с.
6. The effects of climate change on hailstorms / T. H. Raupach [et al.] // Nat Rev Earth Environ. – 2021. – № 2. – P. 213–226. – URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9> (дата обращения: 16.04.2021).
7. Национальных центров экологического прогнозирования США. Центр экологического моделирования: официальный сайт. – URL: <https://www.emc.ncep.noaa.gov/> (дата обращения: 16.04.2021).

Д. М. Караваев*,

кандидат технических наук;

А. Б. Лебедев**,

кандидат технических наук, доцент;

Н. О. Моисеева***,

кандидат технических наук;

Г. Г. Щукин****,

доктор физико-математических наук, профессор

*ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

**Российский Государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург.

***Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, г. Санкт-Петербург.

**** Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром.

ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРОВ ДЛЯ ДИГНОСТИКИ МЕЗОСТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ

В статье обсуждаются возможности наземной СВЧ-радиометрии для диагностики мезомасштабной структуры атмосферных фронтов. Кратко изложена методика проводимых исследований и рассмотрены некоторые результаты экспериментов, проведенных в Ленинградской области. Для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков использовались измерения радиотеплового излучения радиометров водяного пара, работающих на частотах вблизи линии водяного пара 22,235 ГГц. В качестве примера проводится анализ случая прохождения фронтов циклона в сентябре 2020 г. в Ленинградской области.

Ключевые слова: микроволновый радиометр, атмосферный фронт, влагозапас атмосферы, водозапас облаков.

ВВЕДЕНИЕ

Современные дистанционные средства метеорологических измерений (спутниковые, наземные радиолокационные пассивные и активные) дают возможность исследовать мезомасштабную структуру атмосферных фронтов и имеют перспективы для совершенствования технологии предупреждения опасных явлений погоды, методов сверхкраткосрочного прогнозирования на основе комплексного усвоения данных разнородной метеорологической информации [1–3]. Распространение получают наземные СВЧ-радиометры влажностного зондирования облачной атмосферы, которые позволяют проследивать изменение отдельно и одновременно общего содержания парообразной и жидкокапельной влаги в тропосфере в реальном времени с высоким пространственно-временным разрешением. Представляет интерес комплексный анализ результатов наземных микроволновых измерений параметров атмосферы с данными спутниковых наблюдений в видимом и ИК диапазонах спектра и стандартных метеорологических наблюдений при прохождении атмосферных фронтов с целью исследования возможностей оперативного анализа синоптической и мезомасштабной структуры атмосферных фронтов.

При анализе в настоящей работе используются данные об интегральных характеристиках влагосодержания атмосферы: влагозапас атмосферы – интегральное содержание водяного пара в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения; водозапас облаков – интегральное содержание жидкокапельной влаги в облаках также в вертикальном столбе единичного сечения. Для их определения используется СВЧ-радиометрический метод [4], основанный на связи вышеупомянутых характеристик влагосодержания с результатами измерений интенсивности нисходящего радиотеплового излучения атмосферы на двух частотах вблизи линии водяного пара 22,235 ГГц. Используемые в экспериментах двухчастотные СВЧ-

радиометры водяного пара (РВП) работали на частотах около 20,7 и 32 ГГц и позволяли определять характеристики влагосодержания атмосферы с дискретностью по времени около 5 с. Технические характеристики приборов подробнее рассмотрены в работе [5].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Проводимый анализ условно можно разделить на два этапа: этап синоптического (фронтологического) анализа и этап мезомасштабного анализа (мезоанализа). На этапе синоптического анализа выполнялись следующие процедуры:

- идентифицировался сам факт прохождения атмосферного фронта (АФ) через пункты наблюдений;
- идентифицировался тип фронта (теплый фронт, холодный фронт, фронт окклюзии);
- определялся период прохождения фронта через пункты наблюдений.

Фронтологический анализ выполнялся по общепринятой методике, изложенной в руководящих документах [6, 7].

Рассматриваемые случаи представляют, как правило, циклоны, т. е. последовательное прохождение теплого и холодного фронтов или фронта окклюзии. Синоптический анализ обязательно включает анализ спутниковых изображений облачности в видимом и ИК диапазонах спектра, полученных либо с помощью пункта приема спутниковой информации «Сюжет-МБ», либо с общедоступных метеорологических сервисов [8, 9]. В случае неоднозначности в определении положения атмосферного фронта дополнительно учитывалась взаимосвязь расположений АФ и струйных течений.

Период прохождения АФ определялся по характерным признакам прохождения конкретного АФ путем анализа данных кольцевых карт погоды и уточнялся с учетом анализа данных дневников погоды близлежащих гидрометеорологических станций (Центр погоды в Санкт-Петербурге, пос. Сосново и пос. Воейково). При анализе за начало прохождения теплого фронта условно принимался срок наблюдений, который регистрировал десятибалльную облачность верхнего или среднего (при отсутствии облаков верхнего) ярусов; за окончание прохождения теплого фронта – некоторый момент времени между сроками наблюдений, между которыми прекращалось выпадение обложных осадков и (или) происходил правый поворот ветра. За начало прохождения холодного фронта условно принимался момент времени между сроками, между которыми наблюдался правый поворот ветра, а за завершение его прохождения – срок, за который наблюдалось количество облачности менее 10 баллов среднего или верхнего яруса. Очевидно, за начало прохождения фронта окклюзии принимался характерный признак начала прохождения теплого фронта, за окончание его прохождения – характерный признак завершения прохождения холодного фронта. Поскольку каждый АФ является уникальным, в каждом конкретном случае вопрос о начале и завершении прохождения АФ принимался индивидуально. Кроме того, для уточнения положения и вертикальной структуры фронта использовались данные комплексного температурно-ветрового зондирования.

Анализ мезомасштабной структуры АФ включал:

- анализ временного хода влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, полученных по данным измерений РВП в Ленинградской области [5];
- анализ временного хода температуры и давления, измеренных, в том числе, с помощью метеорологических датчиков РВП;
- сравнение результатов измерений РВП с хронологией прохождения АФ по данным метеорологических измерений и спутниковых наблюдений;
- выявление мезомасштабных особенностей АФ.

При этом фронт должен пересекать пункт наблюдений по траектории близкой к нормали относительно линии самого фронта, а случаи, при которых атмосферные фронты находились

в параллельных потоках и протягивались линией фронта вдоль измерительных станций, из рассмотрения исключались.

АНАЛИЗ СЛУЧАЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ЦИКЛОНА

Комплексный синоптический анализ, выполненный на основе имеющегося в наличии аэросиноптического материала, свидетельствует о прохождении в период с 00 ч до 19 ч СГВ (среднее время по Гринвичу) 12 сентября 2020 г. через ст. Санкт-Петербург теплого фронта и в период с 01 ч до 04 ч СГВ 13 сентября 2020 г. холодного фронта. За момент начала прохождения теплого фронта был условно принят срок 00 ч СГВ, с которого на ст. Санкт-Петербург наблюдался (в ночное время) рост температуры. Наличие облаков верхнего яруса по данным наблюдений не отмечалось, так как если они и были, то были замаскированы 8-балльной слоисто-кучевой облачностью. Согласно анализу данных радиозондирования на ст. Воейково за 00 ч СГВ по методике, описанной в [6, 7], в верхней тропосфере наблюдались условия, благоприятные для наличия облаков верхнего яруса. Момент завершения прохождения теплого фронта приходится на период между 18 и 21 ч СГВ, когда произошло резкое увеличение высоты нижней границы облачности. С помощью данных наземных наблюдений более точно определить момент прохождения теплого фронта не представляется возможным, так как прохождение фронта было плохо выражено в поле ветра и давления на всех трех станциях, а повышение температуры сменилось понижением при выпадении дождя. По данным измерений РВП (рис. 1,а) прохождение теплого фронта 12 сентября проявляется в росте влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Из физических соображений следует ожидать, что для отражения мезомасштабных полос осадков также информативным будет временной ход радиоярких температур на частотах 32 ГГц и 20,7 ГГц. Карта приземного анализа за 03 ч СГВ приводится на рис. 1,б. Изображение облачности рассматриваемого циклона 12 сентября 2020 г. по данным радиометра AVHRR (канал 2 при длине волны 0,72–1,1 мкм) космического аппарата (КА) NOAA-18 показано на рис. 2.

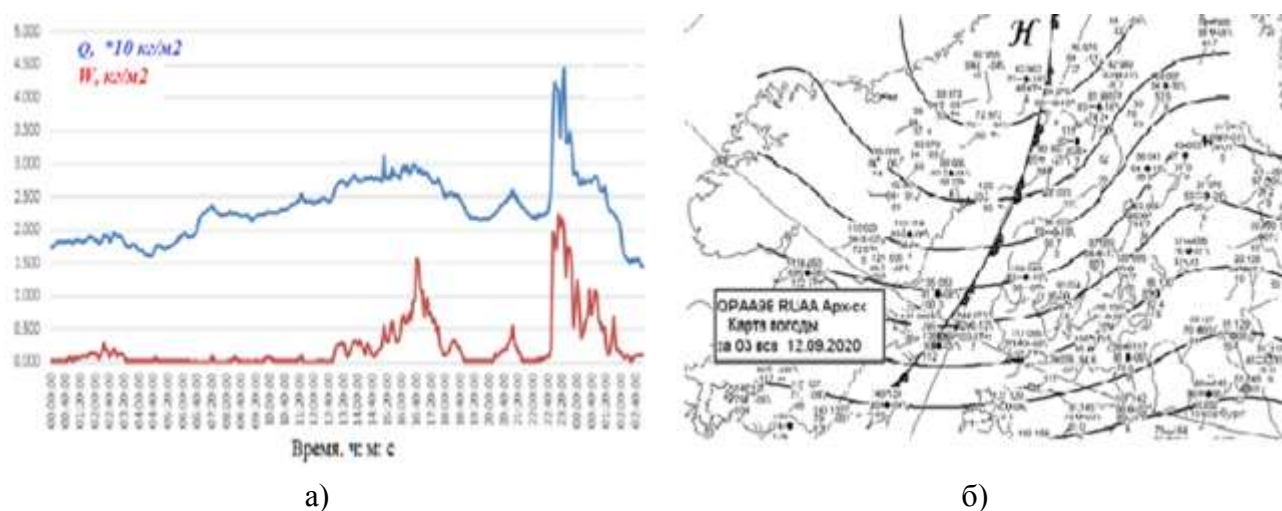


Рис. 1. Синоптическая обстановка:

а – временной ход влагозапаса атмосферы (синий) и водозапаса облаков (красный) 12 сентября 2020 г.; б – карта приземного анализа 03 ч СГВ 12 сентября 2020 г.

Фоновые значения параметров атмосферы (значения, при которых влияние фронта не проявляется), наблюдавшиеся во второй половине 11 сентября, при отсутствии облаков нижнего яруса для влагозапаса атмосферы составляли около 13 кг/м^2 , для водозапаса облаков –

около $0,008 \text{ кг/м}^2$. В период с 00 ч до 04 ч наблюдался рост характеристик влагосодержания, а затем уменьшение до фоновых значений. Это можно объяснить прохождением слоисто-кучевой облачности, что не является характерным для прохождения АФ. Рост водозапаса атмосферы несколько запаздывает (почти на 4 ч) относительно появления предвестников прохождения теплого фронта – облаков верхнего яруса, РВП не регистрирует льдозапас облаков верхнего яруса. Рост водозапаса облаков начинается существенно позже относительно начала роста водозапаса атмосферы, что можно объяснить усилением процессов облако- и осадкообразования вблизи линии фронта. Данная закономерность выявлена также на основе анализа множества случаев прохождения теплых фронтов.

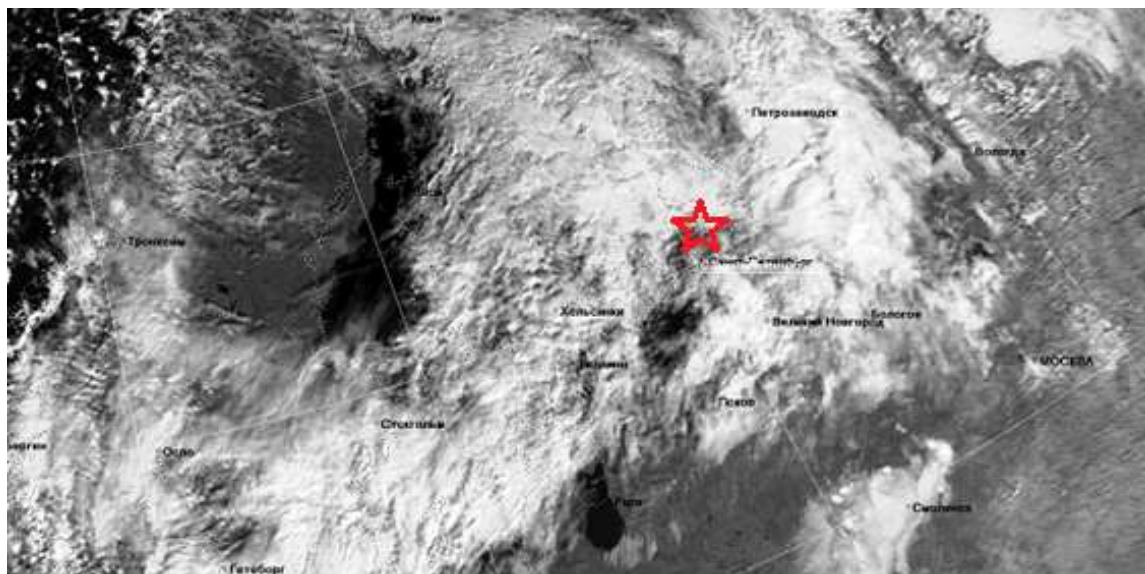


Рис. 2. Изображение облачности циклона 12 сентября 2020 г. 09 ч 10 мин СГВ

В соответствии с данными работы [1], на теплом фронте полосы осадков имеют ширину порядка 50 км, расстояние между соседними полосами составляет порядка 100 км.

На изобарической поверхности 700 гПа, которую обычно принимают за уровень ведущего потока, по данным комплексного температурно-ветрового зондирования 12 сентября 2020 г. в 12 ч СГВ на ст. Воейково скорость ветра составляла 14 м/с (50 км/ч). Для расчета скорости перемещения фронта скорость ветра умножают на коэффициент приведения, который для теплого фронта составляет 0,8 [6, 7]. Таким образом, перемещение полосы осадков шириной 50 км со скоростью 40 км/ч должна составлять около 1 ч 15 мин. Рост водозапаса облаков сопровождается появлением характерных всплесков: в 07 ч 20 мин СГВ (отмечался на одном измерении до значения $0,09 \text{ кг/м}^2$); в период с 08 ч 20 мин до 08 ч 25 мин (до значения $0,06\text{--}0,07 \text{ кг/м}^2$); в период с 09 ч 50 мин до 10 ч 05 мин (до значения $0,06\text{--}0,08 \text{ кг/м}^2$); в период с 11 ч 20 мин до 11 ч 25 мин (до значения $0,06\text{--}0,08 \text{ кг/м}^2$). Всплески водозапаса облаков можно принять за полосы более плотной облачности – не до конца сформировавшиеся полосы осадков. Рост водозапаса облаков при прохождении теплого фронта (см. рис. 1, а) имел не монотонный характер, а был промодулирован волнами более высокой частоты.

По данным измерений на ст. Санкт-Петербург в срок 12 ч СГВ наблюдалась низкая слоистая облачность (высота нижней границы 300 м), между сроками 12 ч и 15 ч СГВ наблюдался дождь. Первая волна наблюдалась в период с 12 ч 45 мин СГВ до 13 ч 30 мин, имела трехгорбую форму, водозапас облаков при этом вырос от фоновых значений до $0,24\text{--}0,32 \text{ кг/м}^2$ (наблюдались в период с 12 ч 00 мин до 12 ч 20 мин СГВ). Вторая волна наблюдалась в период с 13 ч 35 мин до 14 ч 45 мин СГВ, имела трехгорбую форму, водозапас облаков увеличился от $0,07 \text{ кг/м}^2$ до $0,34 \text{ кг/м}^2$. Третья волна наблюдалась в период с 14 ч 45 мин до 15 ч 45

мин СГВ, имела двухгорбую форму, водозапас облаков увеличился от $0,08 \text{ кг/м}^2$ до $0,55 \text{ кг/м}^2$. Четвертая волна наблюдалась в период с 15 ч 50 мин до 17 ч 00 мин СГВ, имела трехгорбую форму, водозапас облаков увеличился от $0,33 \text{ кг/м}^2$ до $1,57 \text{ кг/м}^2$. В период с 16 ч 35 мин до 16 ч 55 мин СГВ наблюдался главный максимум водозапаса облаков данного теплового фронта. По мере приближения к линии фронта увеличиваются длина волны и водозапас облаков.

Следует предположить, что вышеописанные волны являются полосами осадков теплового фронта. Стоит также отметить, что полученные пространственно-временные параметры полос осадков отличаются от параметров, полученных в [1].

Далее, в период с 17 ч 05 мин до 17 ч 55 мин СГВ наблюдается уменьшение водозапаса облаков от $0,97 \text{ кг/м}^2$ до $0,09 \text{ кг/м}^2$, что можно принять за завершение прохождения теплового фронта. Таким образом, время завершения прохождения теплового фронта было уточнено (с 19 ч по данным комплексного анализа до 18 ч по данным РВП).

В теплом секторе рассматриваемого циклона было отмечено два максимума:

- в период с 18 ч 00 мин до 18 ч 55 мин рост водозапаса облаков до значения $0,33 \text{ кг/м}^2$;
- в период с 20 ч 10 мин до 21 ч 30 мин рост водозапаса облаков до значения $0,54 \text{ кг/м}^2$.

Особенностью данных максимумов являются относительно равномерный рост и уменьшение водозапаса облаков. В соответствии с экспериментальными данными, изложенными в [1], в теплом секторе циклона полосы осадков имеют ширину порядка 50 км. Пространственные параметры полос осадков теплового сектора лучше согласуются с данными предшествующих исследований [1].

По данным комплексного синоптического анализа момент начала прохождения холодного фронта приходится на период между 00 ч и 03 ч СГВ 13 сентября 2020 г., когда наблюдались правый поворот ветра и начало ливневых осадков. По данным РВП резкий рост влагозапаса атмосферы (с 23 кг/м^2 до 45 кг/м^2) и водозапаса облаков (с $0,08 \text{ кг/м}^2$ до $2,26 \text{ кг/м}^2$) наблюдался период с 22 ч 45 мин 12 сентября 2020 г. до 00 ч 10 мин 13 сентября 2020 г., которые могут быть обусловлены прохождением кучево-дождевой облачности непосредственно перед линией холодного фронта у поверхности (при интерпретации измерений необходимо учитывать возможную некорректность данных РВП в период осадков). Таким образом РВП позволил уточнить время прохождения холодного фронта. После резкого роста водозапас облаков уменьшился до значений $0,37 \text{ кг/м}^2$. После прохождения холодного фронта вблизи подстилающей поверхности уменьшение водозапаса облаков было промодулировано двумя волнами:

- в период с 00 ч 10 мин до 01 ч 25 мин максимум водозапаса облаков составил $1,10 \text{ кг/м}^2$;
- в период с 01 ч 25 мин до 02 ч 05 мин максимум водозапаса облаков составил $0,68 \text{ кг/м}^2$.

В соответствии с экспериментальными данными, изложенными в [1], полосы осадков на холодном фронте наблюдаются двух видов: одни (на некотором удалении от линии фронта) имеют ширину порядка 50 км; другие (вблизи линии фронта) имеют ширину порядка 5 км. На основании имеющихся в распоряжении данных об осадках не представляется возможным опровергнуть или подтвердить данную закономерность. По мере удаления от линии фронта вблизи поверхности горизонтальные размеры волн и водозапас облаков уменьшаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты демонстрируют новые возможности исследования мезомасштабной структуры атмосферных фронтов на основе применения методов и средств СВЧ-радиометрических измерений характеристик влагосодержания атмосферы. Полученные результаты исследования временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при прохождении атмосферных фронтов относятся к теплому периоду, причем в рас-

сматриваемый период АФ проходили через Ленинградскую область вблизи точки окклюзии, поэтому рассмотренные теплые сектора циклонов имели ограниченные размеры.

Оценивая возможность практического использования полученных результатов при гидрометеорологическом обеспечении, следует отметить, что анализ временного хода водозапаса облаков на основе данных микроволновой радиометрии существенно лучше диагностирует положение пункта наблюдения в структуре циклона по сравнению с анализом комплекса аэросиноптического материала, обычно используемого в оперативной практике. Кроме того, перспективны исследования применения данных наземной СВЧ-радиометрии при текущем сверхкраткосрочном прогнозировании опасных явлений погоды, прохождении теплых фронтов и фронтов окклюзии.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект 21-19-00378 (<https://rscf.ru/project/21-19-00378/>).

Список используемых источников

1. Вельтищев Н. Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование: сб. лекций. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 137 с.
2. Караваев Д. М., Щукин Г. Г. Совершенствование методов раннего предупреждения развития грозových процессов и выявления зон обледенения в облаках на основе комплексного использования методов активной и пассивной радиолокации // Гидрометеорология и экология. – 2021. – Вып. 62. – С. 7–26.
3. Лебедев А. Б., Караваев Д. М., Щукин Г. Г. Применение микроволновой радиометрии для синоптического анализа атмосферных фронтов // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: материалы конф. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. – С. 226–231.
4. Радиотеплолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко [и др.]. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 253 с.
5. Пространственно-разнесенные измерения характеристик влагосодержания атмосферы с применением радиометров водяного пара в окрестности Санкт-Петербурга / В. Ю. Быков [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 680. – С. 205–209.
6. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – Ч. 1. – 704 с.
7. Руководство по практическим работам метеорологических подразделений авиации Вооруженных Сил. – М.: Воениздат, 1992. – 488 с.
8. Архив телеметрии NOAA. – URL: <http://smisdata.iki.rssi.ru/data/noaa/html/> (дата обращения: 04.03.2022).
9. Архивы погоды: Ленинградская область, Россия. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 04.03.2022).

Д. А. Коберник*,

кандидат технических наук;

В. В. Лукин*;

В. В. Руденко*,

кандидат физико-математических наук, доцент;

И. А. Рыбин*,

кандидат технических наук, доцент

*ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» МО РФ, г. Сергиев Посад.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИНЖЕКЦИЕЙ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ОТ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ СТАРТУЮЩИХ РАКЕТ

Представлена аналитическая модель оценки изменения состава ионосферы при инжекции в нее продуктов сгорания от работающих двигателей стартующих мощных ракетносителей, включающая в себя решение уравнения для нейтральных компонент продуктов сгорания и уравнения для концентрации электронов. Полученные данные позволяют оценить полное электронное содержание по заданным траекториям и сопоставить его с результатами измерений, полученных с помощью сети ГНСС-приемников.

Ключевые слова: GPS-мониторинг ионосферы, полное электронное содержание, ракеты-носители, дистанционная диагностика ионосферы, выброс продуктов горения в ионосферную плазму, околоземное космическое пространство.

ВВЕДЕНИЕ

Создание в последнее время спутниковых радионавигационных систем, позволяющих решать задачи, связанные с определением точного местонахождения объектов на поверхности Земли, открыло дополнительные возможности для мониторинга возмущений в ионосфере. Инжекция продуктов работы двигательных установок ракет, выводящих на орбиту космические аппараты, является одним из факторов, приводящих к искусственной модификации верхней атмосферы, ионосферы и околоземного космического пространства (ОКП). Каналы воздействия стартующих ракет на верхнюю атмосферу и ионосферу чрезвычайно разнообразны, поэтому в данном исследовании ограничимся оценками изменения свойств ионосферной плазмы за счет ее химической модификации продуктами сгорания работающих двигателей. Наряду с возмущением ионосферы от звуковой волны, эффект химической модификации активно используется в ряде работ [1–6] для мониторинга запусков ракет.

Как известно, инжекция продуктов сгорания работающих двигателей в ионосферную плазму происходит путем диффузии молекул воды (H_2O) и атомарного водорода (H_2), входящих в состав топлива жидкостных и твердотопливных ракет. У твердотопливных ракет к этим веществам добавляется оксид алюминия (Al_2O_3). В дальнейшем указанные молекулы взаимодействуют с ионами атомарного кислорода O^+ , являющегося одним из основных ионов в F-слое ионосферы, или непосредственно с электронами (для Al_2O_3). Ионно-молекулярные взаимодействия приводят к образованию положительных ионов (OH^+ , H_2O^+), которые при диссоциативной рекомбинации взаимодействуют с электронами (e^-), в результате чего образуется область пониженной концентрации плазмы («дыра» ионизации). Характерный размер такой области достигает нескольких сот километров и может существовать несколько часов. Расчетная методика для оценки ионосферных возмущений, обусловленных инжекцией продуктов горения топлива при работе двигателей стартующих ракет, включает в себя решение следующих задач:

– расчет траектории движения стартующей ракеты в F-слое ионосферы;

- оценку распределения концентрации инжектируемых в ионосферу продуктов горения топлива двигателей стартующих ракет;
- оценку последствий химического взаимодействия, обусловленного инжекцией продуктов горения топлива двигателей стартующих ракет, приводящего к образованию «дыры» в ионосфере;
- оценку изменения полной концентрации электронов и сопоставление полученных результатов с данными, регистрируемыми с помощью датчиков сети ГНСС-приемников.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЗАПУСКАХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Физическая модель рассматриваемых и учитываемых в методике процессов предполагает проведение оценки изменения концентрации электронов, вызванных возмущениями в ионосфере от последствий работы двигателей стартующих ракет. Инжекция веществ от работающих двигателей ракеты на начальной стадии, характерное время которой составляет порядка единиц характерных времен между соударениями взаимодействующих частиц, предполагает стадии ударной волны, распространения и охлаждения вещества с последующим процессом терморегуляции [5]. В дальнейшем основным процессом распространения инжектируемых веществ в ионосфере является процесс диффузии. Поскольку коэффициент диффузии обратно пропорционален плотности ионосферы, то он экспоненциально растет с высотой, что и определяет расположение основной области возмущения в нижней части F -слоя.

В случае отсутствия внешнего воздействия ионосфера на уровне F -слоя состоит из большого количества составляющих, основными из которых являются атомы O , N_2 , O_2 , ионы атомарного кислорода O^+ и электроны e^- [3, 5, 6]. Высотные распределения концентрации основных атмосферных газов и электронов (в $см^{-3}$) представлены на рис. 1, а, б.

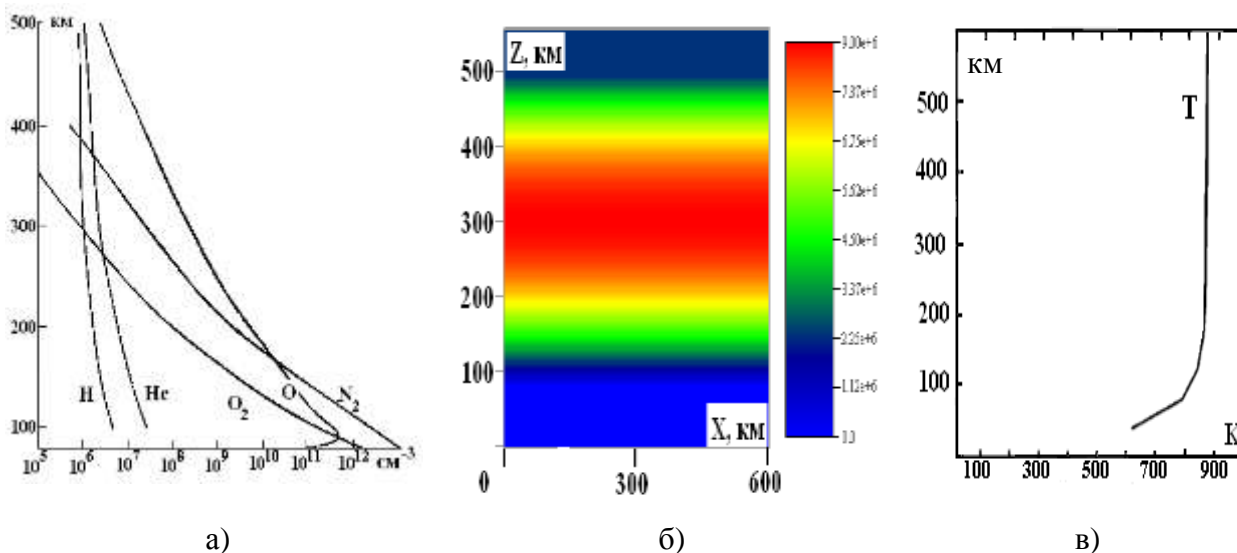
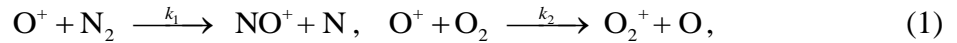


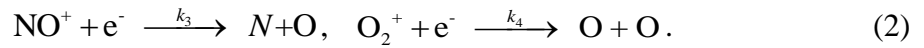
Рис. 1. Высотные распределения концентрации основных атмосферных газов (а), электронов (в $см^{-3}$) (б) и температуры нейтралов на средних широтах (в)

Ионизация атомов происходит, в основном, за счет воздействия солнечного коротковолнового излучения (среднеширотная атмосфера). На высоких широтах к этому добавляется воздействие потоков высыпающихся энергичных частиц. В области главного ионосферного максимума концентрация ионов O^+ более чем на порядок превышает концентрации других ионов, причем $[O^+] = [e^-]$. Равновесие в слое устанавливается в результате уравнивания дей-

ствия фотохимических процессов и амбиполярной диффузии. Соответствующие ионно-молекулярные реакции при этом имеют вид [5–7]



с последующей диссоциативной рекомбинацией:



Поскольку величины $k_1[\text{N}_2]$ и $k_2[\text{O}_2]$ (k_1-k_4 – скорости протекания соответствующих реакций, $[X]$ – концентрация частиц сорта X) примерно на два порядка меньше, чем $k_3[e^-]$ и $k_4[e^-]$, то уравнение баланса для концентрации электронов $n(e^-)$ имеет вид

$$\frac{dn(e^-)}{dt} = \frac{\partial n(e^-)}{\partial t} + \text{div}(n(e^-)\vec{V}_e) = f(z, \theta) - \beta(z)n(e^-), \quad \beta(z) = [K_1n(\text{N}_2) + K_2n(\text{O}_2)], \quad (3)$$

где $f(z, \theta)$ – функция источника электронов от солнечного воздействия (близка к распределению Чапмена [3, 7]), зависящая от высоты z и угла солнечного зенита θ ;

$\beta(z)$ – линейный коэффициент потерь.

Уравнение (3) является уравнением непрерывности для концентрации заряженных частиц в рамках квазигидродинамического приближения. Скорость электронов получается в рамках решения системы уравнений для скоростей электронов и ионов в рамках этого же приближения. Обозначим через ω_H , Ω_H – гирочастоты электронов и ионов, а через ν_{ei} , ν_{en} , ν_{in} – частоты соударения электронов, ионов и нейтралов. В случае если величины $\omega_H / (\nu_{ei} + \nu_{en})$ и Ω_H / ν_{in} много больше единицы, а концентрации и скорости частиц изменяются медленно по сравнению с частотами соударения частиц, то для скорости заряженных частиц получим соотношение [5–7]

$$\vec{V}_e = -D \left(\frac{\sin \alpha}{H_p} + \frac{\nabla(n(e^-)T_p)}{n(e^-)T_p} \cdot \vec{h} \right) \vec{h} + (\vec{V}_n \cdot \vec{h}) \vec{h}, \quad T_p = (T_e + T_i) / 2, \quad H_p = 2k_B T_p / (gM_i) \quad (4)$$

где D – коэффициент амбиполярной диффузии изотропной плазмы, $D = gH_p/\nu_{in}$;

T_e, T_i – температуры электронов и ионов;

\vec{h} – единичный вектор в направлении геомагнитного поля Земли;

α – угол его наклона;

\vec{V}_n – скорость движения нейтралов;

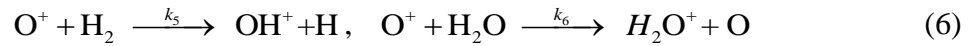
M_i – масса ионов.

Если оценить величину магнитного поля Земли как 0,4 Гс, то $\omega_H \approx 7 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, а $\Omega_H \approx 2 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ и соответственно, на высотах больше 120–150 км эти величины существенно больше частот соударений, что и обосновывает справедливость применения формулы (4). Отметим, что в рассматриваемом приближении движение заряженных частиц происходит исключительно вдоль силовой линии магнитного поля Земли.

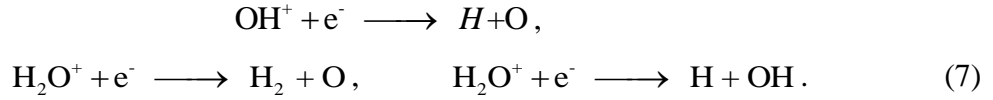
Можно считать, что в случае отсутствия инжекции частиц уравнение (3) описывает квазиравновесный процесс, в масштабах времени создания и рассасывания «дыры». Из этого следует, что функция источника электронов от солнечного воздействия $f(z, \theta)$ может быть оценена через существующее в данный момент времени распределение электронов $n^*(e^-)$:

$$f(z, \theta) = \text{div}(n^*(e^-)\vec{V}_e) + \beta(z)n^*(e^-). \quad (5)$$

В случае работы ракетных двигателей в ионосферу инжектируется водород (H_2) и вода (H_2O), которые взаимодействуют с ионами O^+ по следующим реакциям:



с последующей диссоциативной рекомбинацией:



Аналогично случаю без воздействия уравнение баланса для концентрации электронов приобретает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(e^-)}{\partial t} + \operatorname{div}(n(e^-)\vec{V}_e) &= f(z, \theta) - \beta(z)n(e^-) - [\beta_{H_2O}(z) + \beta_{H_2}(z)]n(e^-), \\ \beta_{H_2O}(z) &= K_6 n(H_2O), \quad \beta_{H_2}(z) = K_5 n(H_2). \end{aligned} \quad (8)$$

Если сориентировать ось OY в направлении север-юг, а ось OX в направлении восток-запад, как показано на рис. 2, то вектор \vec{h} будет лежать в плоскости OZY . В этом случае в уравнении (8) слагаемое, отвечающее за растекание частиц, будет иметь вид

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(n\vec{V}_e) &= -D \left(\cos^2 \alpha \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} + \sin^2 \alpha \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \right) - D \sin 2\alpha \frac{\partial^2 n}{\partial y \partial z} - \\ &- \frac{\partial n}{\partial y} \left(G_1 \frac{\sin 2\alpha}{2} - V_n^y \cos^2 \alpha - V_n^z \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) - \frac{\partial n}{\partial z} \left(G_1 \sin^2 \alpha - V_n^z \sin^2 \alpha - V_n^y \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) - \\ &- n \sin^2 \alpha \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{D}{H_p} \right) + \frac{\partial D}{\partial z} \frac{\partial \ln T_p}{\partial z} + D \frac{\partial^2 \ln T_p}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где $G_1 = \frac{D}{H_p} + D \frac{\partial \ln T_p}{\partial z} + \frac{\partial D}{\partial z}$.

Получаемая в результате решения уравнения (8) с дивергенцией, заданной формулой (9), величина $n(e^-)$ зависит от пространственных координат и времени. Обозначая через $N_e(h)$ полученную через $n(e^-)$ концентрацию электронов как функцию высоты h , можно получить величину $\int N_e(h)dh$, называемую ТЕС, которая получается путем интегрирования уравнения (3) в случае отсутствия воздействия и (8) при наличии воздействия.

Для экспериментальной регистрации изменения концентрации электронов используется сеть ГНСС-приемников, принимающих сигналы геостационарных (высокоорбитальных) спутников. Результатом использования сети ГНСС-приемников является массив наклонного полного электронного содержания (ПЭС) по всем возможным направлениям спутник – наземный приемник. Приемники ГНСС-сигналов регистрируют данные о фазовых задержках на двух частотах $f_1 = 1,575$ ГГц и $f_2 = 1,227$ ГГц. Наклонная суммарная электронная плотность вдоль зрительной оси между приемником и спутником I_s определяется формулой

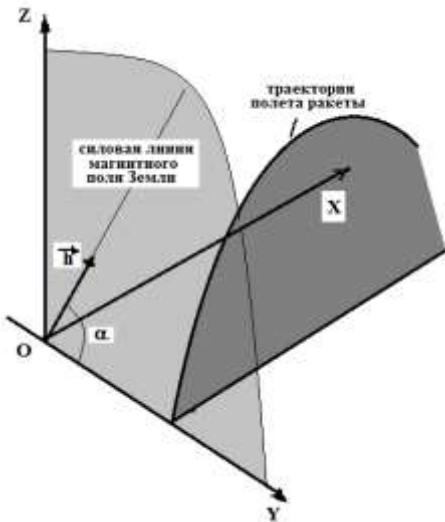


Рис. 2. Постановка задачи, исходная система координат

Для экспериментальной регистрации изменения концентрации электронов используется сеть ГНСС-приемников, принимающих сигналы геостационарных (высокоорбитальных) спутников. Результатом использования сети ГНСС-приемников является массив наклонного полного электронного содержания (ПЭС) по всем возможным направлениям спутник – наземный приемник. Приемники ГНСС-сигналов регистрируют данные о фазовых задержках на двух частотах $f_1 = 1,575$ ГГц и $f_2 = 1,227$ ГГц. Наклонная суммарная электронная плотность вдоль зрительной оси между приемником и спутником I_s определяется формулой

$$I_s = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} ([L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2] + \text{const}_{1,2} + \sigma L), \quad (10)$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты;
 L_1, L_2 – число оборотов фазы несущих на частотах f_1 и f_2 ;
 λ_1, λ_2 – длины волн;
 $\text{const}_{1,2}$ – неоднозначность фазовых измерений;
 σL – ошибка фазовых измерений.

Результаты расчетов, проведенных путем решения уравнения (8), могут быть сопоставлены с результатами натурных измерений по формуле (10).

Анализ уравнения (8) показывает, что дополнительное поглощение электронов обусловлено появлением в ионосфере воды и водорода, инжестируемых в нее при работе двигателей стартующих ракет. Определение концентрации инжестируемых нейтральных частиц основано на начальных данных, полученных из решения задачи об определении траектории движения ракеты (зависимость от времени ее координат). В случае, когда имеется доступ к средствам объективного контроля, можно воспользоваться зависимостью координат и скорости ракеты от времени. В случае, когда точных данных нет, используется упрощенная модель движения ракеты.

Как известно, баллистическая ракета ускоряется за счет отдачи от потока горячих выхлопных газов, выбрасываемых с большой скоростью из сопла двигательной установки. Сила тяги двигателя $F_{\text{тяг}}$ состоит из двух частей, одна из которых есть произведение потока массы dm/dt на скорость истечения $V_{\text{и}}$, а вторая – произведение разности давлений в окружающей среде и на срезе сопла, умноженной на площадь среза сопла. Часто эти слагаемые объединяют посредством введения эффективной скорости истечения V^e и удельного импульса I^s : $F_{\text{тяг}} = \dot{m}V^e = \dot{m}I^s g$, $\dot{m} = dm/dt$, где g – ускорение силы тяжести на уровне моря. Траекторию движения ракеты, использующей гравитационный поворот для достижения максимальной дальности, состоящей из нескольких ступеней, пренебрегая учетом вращения Земли, описываем соответствующим уравнением:

$$M(t) \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_{\text{тяг}} - \vec{F}_{\text{сопр}} - M(t) \frac{R_{\text{зем}}^2}{(R_{\text{зем}} + z)^2} \vec{g}, \quad M(t) = M_0 - \dot{m}t, \quad \vec{r} = \frac{d\vec{V}}{dt}, \quad (11)$$

где $M(t)$ – суммарная масса ракеты и топлива;
 $F_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления, рассчитываемая по формуле

$$F_{\text{сопр}} = 0.5\mu S \rho_{\text{ср}}(z) V^2.$$

Здесь μ – коэффициент лобового сопротивления;
 S – площадь сечения ракеты;
 $\rho_{\text{ср}}$ – плотность среды.

Ступени ракеты, после выгорания топлива в них, отбрасываются. Поскольку масса ракеты уменьшается по мере того, как сгорает топливо, ускорение ракеты возрастает в течение времени работы каждой ступени. Как правило, нахождение ракеты в F-слое ионосферы происходит во время работы второй ступени. Траектория движения ракеты рассчитывается на основе численного решения системы уравнений (11) с использованием соответствующих весогабаритных характеристик. В целом полная схема проведения 3D расчетов для оценки ионосферных возмущений от продуктов работы ракетных двигателей представлена на рис. 3.

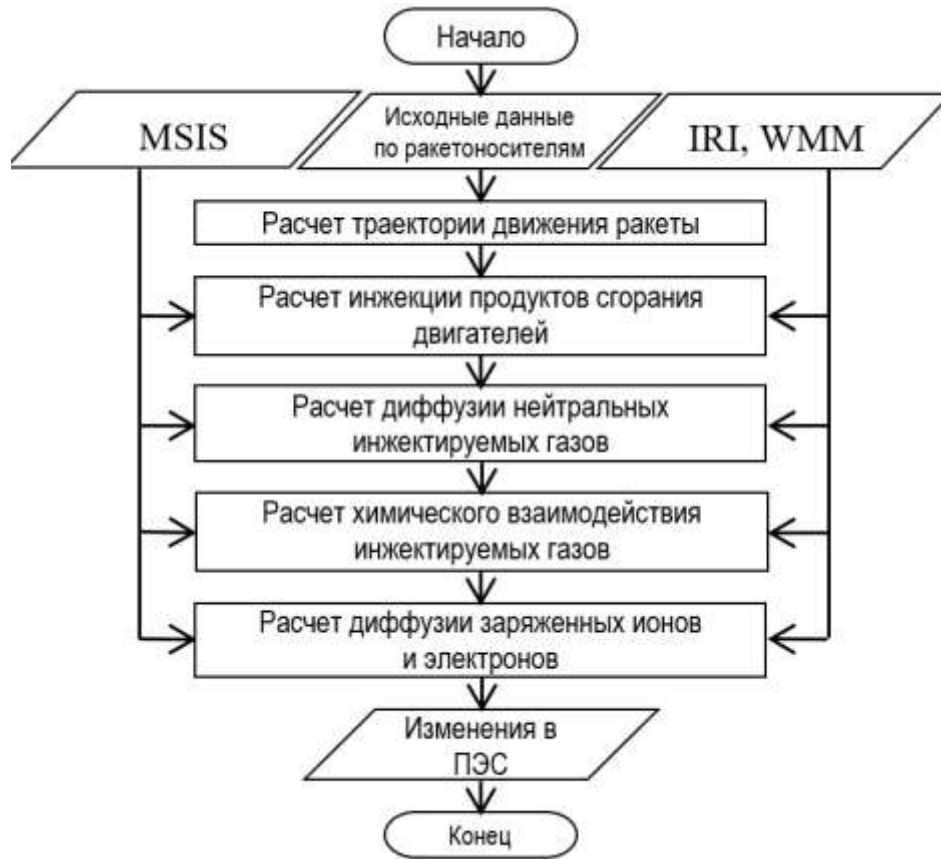


Рис. 3. Алгоритм решения 3D задачи по определению ионосферных возмущений

Концентрация инжектируемых в ионосферу продуктов работы двигателей ракетных установок определяется из решения уравнений непрерывности для концентраций n_i и для скоростей нейтральных частиц газов \vec{w}_i в рамках квазигидродинамического приближения. Эти уравнения имеют вид:

$$\vec{w}_i = \vec{w} - D_i \left[\frac{\nabla n_i}{n_i} + \frac{\vec{k}}{H_i} + \frac{(1 + \tilde{\alpha}_i)}{T} \nabla T \right], \quad i = 1, 2, \quad (12)$$

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla(n_i \vec{w}_i) = P_i - L_i, \quad D_i^{-1} = \sum_{k=1}^K D_{ik}^{-1},$$

где i – инжектируемые вещества;
 D_i – коэффициенты диффузии для каждой компоненты;
 $\tilde{\alpha}_i$ – коэффициент фактора температурной диффузии;
 T – температура нейтральной составляющей ионосферы;
 \vec{k} – единичный вектор в z направлении;
 \vec{w} – компоненты скорости ветра;
 H_i – характерный размер ионосферы, определяемый по формуле

$$H_i = kT / (g\mu_i),$$

где μ_i – масса молекул;

P_i, L_i – источник и потери частиц за счет химических реакций.

Суммирование в формуле для коэффициента диффузии по индексу k осуществляется по всем нейтральным составляющим компонентам ионосферы. Например, аппроксимация для коэффициента диффузии при инъекции H_2O в ионосферу, состоящую из O, N_2, O_2 , имеет вид

$$D_{\text{H}_2\text{O}} = \left[\frac{n_{\text{O}}}{8,46 \times 10^{17} T^{0,5}} + \frac{n_{\text{N}_2}}{2,04 \times 10^{17} T^{0,623}} + \frac{n_{\text{O}_2}}{2,02 \times 10^{17} T^{0,632}} \right]^{-1}, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Подставляя выражение для скорости в уравнение для концентрации частиц (12) в предположении, что ионосфера горизонтально стратифицирована, т. е. компоненты \vec{w} , D_i и T являются функциями только от вертикальной координаты z , получим уравнение, напоминающее по виду уравнение диффузии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} = & - \left[w_x \frac{\partial n_i}{\partial x} + w_y \frac{\partial n_i}{\partial y} + \frac{\partial(n_i w_z)}{\partial z} \right] + D_i \left[\frac{\partial^2 n_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} - \frac{n_i}{H_i^2} \frac{\partial H_i}{\partial z} \right] + \\ & + D_i \left[n_i (1 + \alpha_i) \frac{\partial^2 \ln T}{\partial z^2} + (1 + \alpha_i) \frac{\partial n_i}{\partial z} \frac{\partial \ln T}{\partial z} \right] + \frac{\partial D_i}{\partial z} \left[\frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{n_i}{H_i} + n_i (1 + \alpha_i) \frac{\partial \ln T}{\partial z} \right] + P_i - L_i. \end{aligned} \quad (13)$$

Асимптотическое решение уравнения (13) с зависимостью от z коэффициентов диффузии в виде $D(z) = D_0 \exp(z/H_a)$ и начальным условием

$$n_i(x, y, z, t) = N_0 \delta(x, y, z), \quad P_i - L_i = \beta n_i, \quad \beta = [K_1 n(\text{N}_2) + K_2 n(\text{O}_2)]$$

имеет вид [5]

$$\begin{aligned} n_i(\vec{r}, t) = & \frac{N_0}{(4\pi D_i t)^{3/2}} \exp(-(z - z_0) \left(\frac{3}{4H_a} + \frac{1}{2H_i} \right) - \frac{H_a^2 \{1 - \exp(-(z - z_0)/(2H_a))\}^2}{D_i t} \\ & - \frac{(x^2 + y^2) \exp(-(z - z_0)/(2H_a))}{4D_i t} - \left(\frac{1}{H_a} - \frac{1}{H_i} \right)^2 \frac{D_i t \exp((z - z_0)/(2H_a))}{4} - \beta t), \end{aligned} \quad (14)$$

где $(0, 0, z_0)$ – координаты точки, в которой происходит инжекция вещества;
 N_0 – количество инжектированных молекул.

Нетрудно заметить, что при стремлении времени к нулю формула (14) дает сферически симметричное решение для инжектируемого вещества в однородной атмосфере:

$$n_i(\vec{r}, t) = N_0 (4\pi D_i t)^{-3/2} \exp(-(x^2 + y^2 + z^2)/(4D_i t)).$$

Решение уравнения (14) представляет собой асимптотическое решение для точечной инжекции вещества. Сопоставление численных расчетов по формуле (13) с аналитическими расчетами по формуле (14) показывает, что асимптотическая формула остается справедливой для времен порядка десятка минут. Поскольку движение ракеты при работающем двигателе в F -слое длится порядка единиц минут, то моделирование инжекции, возникающей при движении ракеты, можно осуществить путем вброса вещества вдоль траектории ракеты с соответствующим запаздыванием времени.

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ИНЖЕКТИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ И ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Типичный расчет инжекции молекул воды при движении ракеты в F -слое ионосферы показан на рис. 4. Траектория ракеты рассчитана в соответствии с решением уравнения (11) для ракеты со стартовой массой 87500 кг и двигателем, обеспечивающим поток массы $dm/dt = 412$ кг/с и тягу $F_{\text{тяг}} = 2,0$ МН, позволившим к моменту времени 200 с достичь высоты 415 км на расстоянии 416 км от точки старта. Ориентация системы координат показана на рис. 2. За время работы двигателя было инжектировано $1,32 \cdot 10^{28}$ молекул воды.

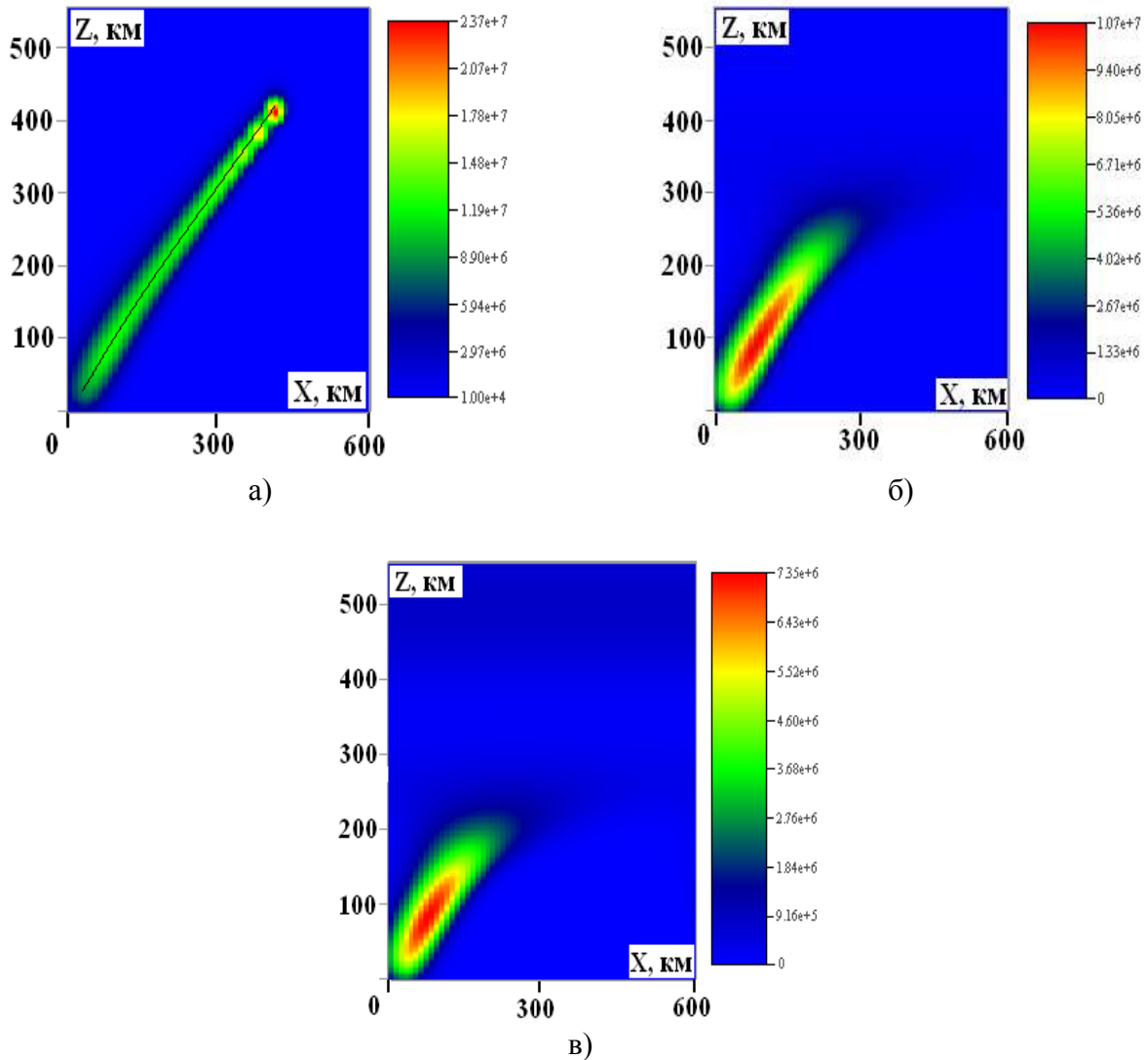


Рис. 4. Высотные распределения концентрации молекул H_2O (в $см^{-3}$), инжектируемых при движении ракеты вдоль траектории ее движения. Сечение (ZX) проведено через траекторию в моменты времени 30 с (а), 180 с (б) и 650 с (в) после выключения двигателя

На рис. 4,а процесс формирования области с выброшенным веществом смоделирован последовательными выбросами в 30 точках, через равные промежутки времени, в соответствии с формулой (14). Эти данные используются в дальнейшем как начальные условия для решения уравнения (13). Уже через 1 мин образующееся облако имеет единое распределение. Со временем концентрация в центре облака уменьшается, облако расплывается за счет диффузии и опускается вниз из-за гравитации.

Концентрация электронов рассчитывалась в соответствии с решением уравнения (8) с заданием на каждом расчетном шаге концентрации нейтральной инжектированной компоненты, рассчитанной в результате решения уравнения (13) по схеме, показанной на рис. 3. Высотные распределения концентрации электронов (в $м^{-3}$) в сечении (ZX), проведенном через траекторию движения в моменты времени 30 с (4а), 180с (4б) и 650с (4в), после выключения двигателя показаны на рис. 5. Полученное распределение концентрации частиц, позволяет получить непосредственное изменение полного электронного содержания и сопоставить его с результатами натуральных измерений по формуле (10).

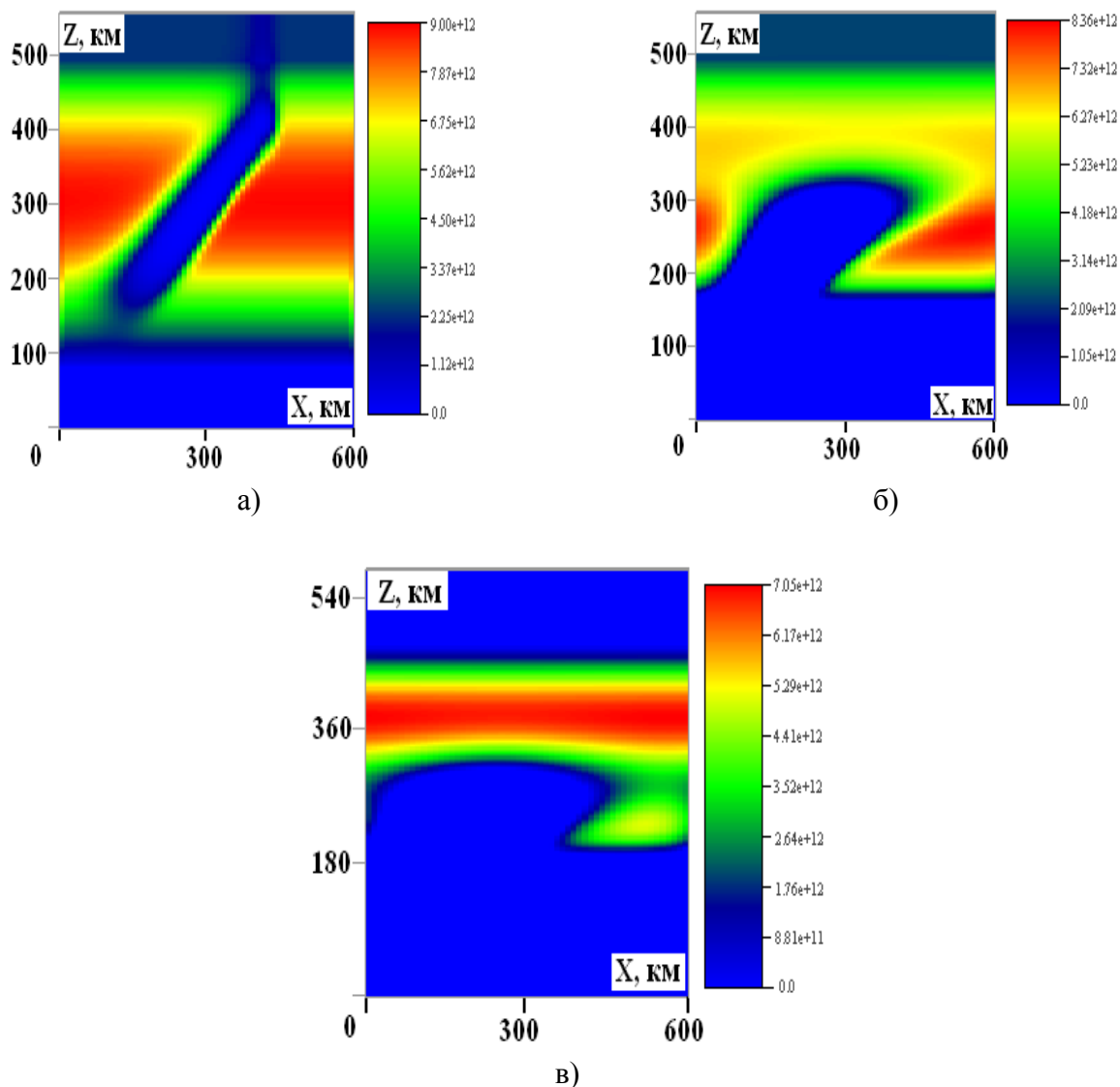


Рис. 5. Высотные распределения концентрации электронов (m^{-3}) в сечении (ZX), проведенном через траекторию движения в моменты времени 30 с (а), 180 с (б) и 650 с (в) после выключения двигателя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена физическая модель, учитывающая минимальный возможный механизм потерь электронов в ионосфере при инжекции продуктов сгорания от работающих ракетных двигателей и позволяющая оценить параметры возникающей при этом ионосферной «дыры». На основе физической модели разработана трехмерная методика расчета крупномасштабных ионосферных возмущений, обусловленных инжекцией продуктов горения топлива при работе двигателей стартующих ракет, которая учитывает диффузию в ионосферу продуктов горения с последующим их химическим взаимодействием со свободными электронами для идентификации запуска ракет на основе измерения полного электронного содержания ионосферы с помощью GPS-мониторинга.

Проведенные исследования позволили:

- разработать и обосновать методику расчета изменения концентрации электронов в ионосфере, обусловленную инжекцией продуктов работы двигателей стартующих ракет;

- получить оценки концентрации и пространственного распределения нейтральных компонент, инжектируемых в ионосферу продуктов работы двигателей стартующих ракет;
- получить оценки изменения концентрации и пространственного распределения электронной составляющей ионосферы, обусловленной химическим взаимодействием между инжектируемыми продуктами от работы двигателей стартующих ракет и нейтральной и ионизированной составляющими ионосферы.

Список используемых источников

1. Адушкин В. В., Козлов С. И., Сильников М. В. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. – М.: ГЕОС, 2016. – 795 с.
2. Системный мониторинг ионосферы: сб. научных тр. / под ред. Н. Г. Котонаевой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 416 с.
3. Седунов Ю. С., Авдюшин С. И. Атмосфера: справочник. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 510 с.
4. Кирюшкин В. В., Афраймович Э. Л., Дисенов А. А. GPS-мониторинг ионосферных возмущений, генерируемых при старте ракет, на больших удалениях от места старта // Геомагнетизм и аэрномия. – 2008. – Т. 48, № 3. – С. 365–380.
5. Bernhardt P. A. The response of the ionosphere to injection of chemical reactive vapors // Technical Report. – Stanford, Calif.: Stanford Electron. Lab., Stanford Univ., 1976. – № 17. – 247 p.
6. Mendillo M. Ionospheric holes: a review of theory and recent experiments // Adv. Space Res. – 1988. – № 8. – P. 51–62.
7. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
8. Hu Yap-Gai, Zhao Zheng-Yu, Zhang Yuan-Nong. Numerical simulation on the early dynamics of barium clouds in the ionosphere // Acta Phys. – 2012. – Vol. 61, № 08. – 089401.

Е. В. Колесников,
Центр гидрометеорологических данных
ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Калужская обл., г. Обнинск.

РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АРХИВНОГО ХРАНЕНИЯ ГОСФОНДА РОСГИДРОМЕТА

Проведен анализ текущего состояния информационной системы архивного хранения Госфонда Росгидромета с описанием информационных процессов сбора, обработки, хранения и предоставления гидрометеорологической информации. Проведено исследование нормативной базы в части хранения Госфонда Росгидромета, структуры и форматов информационных ресурсов (документов архивного хранения), а также функциональной, информационной, системной, программной и архитектуры данных ИС, в контексте действующих информационных процессов объекта исследования – Госфонда Росгидромета.

В результате для каждого информационного процесса были выявлены проблемные места и предложен ряд мероприятий по их модернизации путем применения современных научно-технических средств, методов и алгоритмов разработки ИС. Такой подход позволит достичь улучшения качества соответствующих характеристик управления, долговременного хранения и оперативного предоставления гидрометеорологической информации и продукции потребителям.

Ключевые слова: Госфонд Росгидромета, архивный документ, информационная система, информационная технология, электронный архив, гидрометеорологическая информация, долговременное хранение, удаленный доступ, тезаурус, базовый архив, оперативный архив, обслуживание потребителей.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении большей части своей истории и на сегодняшний день, одной из основных задач, возложенных на Федеральную службу по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), являются обеспечение долговременного хранения документов Госфонда Росгидромета [1] и обслуживание потребителей созданной на их основе, специализированной гидрометеорологической информацией и продукцией.

В 2008 г., на базе ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (структурного подразделения Росгидромета) в соответствии с проектом «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета» и предложенной концепцией модернизации архивной системы мирового метеорологического центра [2] была начата работа по созданию автоматизированной архивной системы (ААС), получившая продолжение в работах [3, 4]. Это поспособствовало коренным образом расширить и улучшить технические возможности выполнения процессов накопления и архивного хранения информации, а также обслуживания данными гидрометеорологических наблюдений, которые обеспечили:

- долговременное хранение документов Госфонда Росгидромета на современных технических носителях, с гарантией физической целостности и сохранности;
- хранение больших объемов информации в электронной форме, в различных форматах, в том числе оцифрованных путем сканирования на специализированном оборудовании гидрометеорологических документов на бумажной основе;
- централизованное управление хранением и предоставлением документов архивного хранения, используя современные телекоммуникационные и программно-аппаратные средства.

На сегодняшний день ААС может решить задачу централизованного долговременного архивного хранения больших объемов разнородной гидрометеорологической информации, ведь в основе электронного архива лежат две ленточные роботизированные библиотеки объемом 4 ПБ каждая. Однако прошло достаточно длительное время и прогресс в сфере информационных технологий ушел вперед относительно технологий, на которых реализованы подсистемы сбора, учета и предоставления гидрометеорологической информации в действу-

ющей ААС. Эти подсистемы не могут обеспечить централизованного управления и оперативного доступа за приемлемое время к документам Госфонда Росгидромета, которые являются востребованными материалами в различных секторах экономики и научной деятельности. Другими словами, удаленный доступ к такому рода информации требуется в круглосуточном режиме, что говорит об актуальности проблемы управления гидрометеорологической информацией в ААС.

Все это наталкивает на мысль, что есть необходимость подготовить предложения по модернизации действующей ААС с целью реализации требований по обеспечению оперативного, удаленного управления документами Госфонда Росгидромета с использованием современных научно-технических методов, средств и алгоритмов разработки информационных систем (ИС).

Таким образом, целью настоящей работы является подготовка перечня мероприятий по модернизации информационной системы архивного хранения Госфонда Росгидромета на основе анализа текущей ААС и обоснований для создания современной информационной системы, позволяющей расширить возможности ААС для решения всего спектра возложенных на нее задач с учетом необходимости масштабирования.

АНАЛИЗ ТЕКУЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АРХИВНОГО ХРАНЕНИЯ ГОСФОНДА РОСГИДРОМЕТА

Прежде чем анализировать текущее состояние, стоит уточнить, что в данной работе рассматривается не полный технологический процесс формирования Госфонда Росгидромета, который начинается с процессов наблюдения, сбора, обработки первичных данных наблюдений и формирования объектов хранения, используя автоматизированные системы и технологии [5]. В данной статье исследуются процессы сбора, обработки, хранения и предоставления уже сформированных объектов долговременного хранения, подлежащих учету – документов Госфонда Росгидромета, поскольку на сегодняшний день именно они требуют модернизации.

На рис. 1 представлена блок-схема технологического процесса формирования Госфонда Росгидромета, на котором исследуемая область выделена блоками синего цвета. Данная схема разработана на основе руководящего документа «Краткие схемы обработки гидрометеорологической информации» (РД 52.19.704) [6], который устанавливает основные виды работ и сроки их проведения при обработке режимной гидрометеорологической информации с момента наблюдения до момента передачи в Госфонд Росгидромета (архивации).

Уточнив предмет исследования, перейдем к рассмотрению структуры и состава документов Госфонда Росгидромета. На сегодняшний день гидрометеорологические документы, подлежащие архивному хранению, зафиксированы в руководящем документе «Перечень документов архивного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении» (РД 52.19.143) [7] – это своего рода реестр объектов хранения, загружаемых в роботизированную библиотеку для долговременного хранения. Его можно классифицировать по нескольким признакам:

- 1) по типу носителя информации:
 - электронные документы (*born digital*);
 - документы на бумажных носителях;
 - документы на фотоносителях;
- 2) по внутренней структуре:
 - структурированные электронные и бумажные документы (ЯОД-файлы);
 - неструктурированные электронные и бумажные документы (текстовые документы, отчеты и т. д.);
- 3) по гидрометеорологическим дисциплинам и видам гидрометеорологических документов (табл. 1).

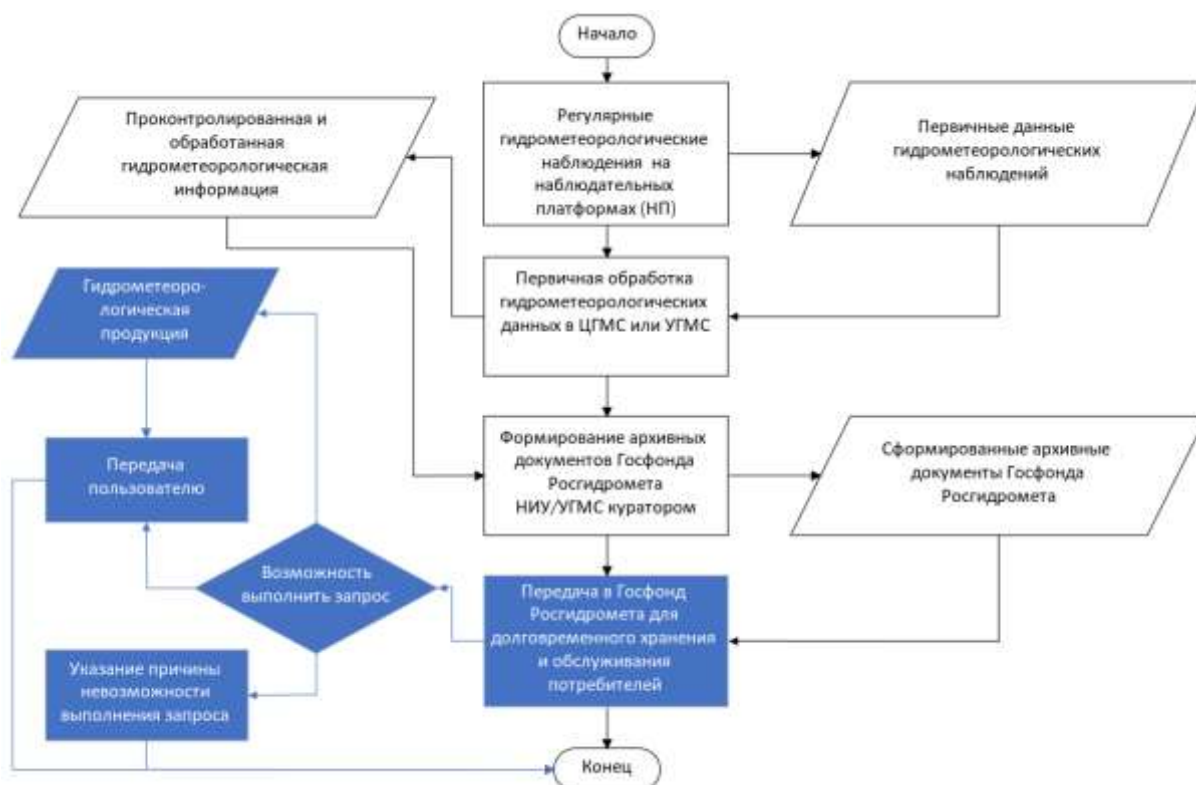


Рис. 1. Блок-схема технологического процесса формирования Госфонда Росгидромета

Таблица 1

Общая классификация объектов хранения по дисциплинам и видам гидрометеорологических документов Госфонда Росгидромета

№ п/п	Дисциплина	Вид гидрометеорологических документов
1	Метеорология	Документы приземных метеорологических наблюдений
		Документы наблюдений, полученные с помощью метеорадиолокаторов
		Документы наблюдений на авиаметеорологических станциях
		Документы высотных метеорологических наблюдений
2	Аэрология	Документы аэрологических наблюдений
3	Агрометеорология	Документы агрометеорологических наблюдений
4	Синоптика	Синоптические документы
5	Гидрология	Документы гидрологических наблюдений
6	Морская гидрометеорология	Документы морских гидрометеорологических наблюдений
7	Загрязнение окружающей среды	Документы наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха
		Документы наблюдений за загрязнением атмосферных осадков
		Документы наблюдений за загрязнением почвы
		Документы наблюдений за загрязнением снежного покрова
		Документы наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши
		Документы наблюдений за загрязнением морских вод
		Документы наблюдений за радиоактивным загрязнением
Общие документы по загрязнению		

Окончание табл. 1

№ п/п	Дисциплина	Вид гидрометеорологических документов
8	Геофизика	Документы актинометрических наблюдений
		Документы озонOMETрических наблюдений
		Документы теплoбалансовых наблюдений
		Документы наблюдений за атмосферным электричеством
		Документы ракетного зондирования атмосферы
		Документы наблюдений за содержанием парниковых газов (углекислый газ, метан)
		Ионосферные и магнитные наблюдения, радиолокация метеорных следов, наблюдения за полярными сияниями
9	Гелиогеофизика	Документы гелиогеофизических наблюдений. Оперативные документы гелиогеофизической службы
10	Искусственные спутники Земли (ИСЗ)	Документы, полученные с помощью искусственных спутников Земли

Создание подобных тезауросов поможет классифицировать объекты хранения с точки зрения их идентификации и поиска в каталожной структуре ААС, а также минимизировать ошибки при заполнении формы описания объектов хранения. Этот момент следует проработать и реализовать в модернизированной ИС, поскольку это качественно улучшит управление документами Госфонда Росгидромета.

В части электронных документов процесс записи в роботизированную ленточную библиотеку был начат незамедлительно и вся информация, хранящаяся на внешних технических носителях, не обеспечивающих постоянное хранение – дискетах, CD/DVD дисках, картриджах IBM 3480 и ПК – была перенесена в ААС (рис. 2) с соблюдением всех требований перезаписи [8–10]. Что же касается документов на бумажной основе, то для записи в ААС их необходимо перевести в электронный вид. Данный процесс был начат в 2010 г. с появлением первого сканирующего оборудования во ВНИИГМИ-МЦД и разработанной технологии сканирования [11, 12]. В конечном итоге технология сканирования была существенно модернизирована [13]. По результатам работы на 01.01.2022 оцифровано путем сканирования порядка 150 000 бумажных документов по метеорологии, синоптике, гидрологии, морской гидрометеорологии, аэрологии, агрометеорологии, геофизике, документов о загрязнении окружающей среды и прочих, наиболее востребованных в работе документов. Сканированные документы были загружены в автоматизированную систему «Электронный фонд отсканированных документов» (АС ЭФОД), которая имеет в своем составе базу данных, содержащую описание каждого отсканированного бумажного документа [14] и функционал по добавлению, редактированию новых и текущих документов и поиску по атрибутам (метаданным) с предоставлением доступа к образу оригинального документа в формате pdf. В дальнейшем есть смысл интегрировать АС ЭФОД в модернизированную ИС архивного хранения Госфонда Росгидромета для централизации процессов.

Основные требования, которые предъявляются к ААС – это обеспечение долговременного хранения, учета и предоставления гидрометеорологических документов по запросу. Аппаратно-программную часть комплекса составляют:

- две ленточные библиотеки IBM TS3500 объемом 4 ПБ каждая;
- дисковый массив IBM DS8300 объемом 100 ТБ;
- сервер управления на базе IBM z9;
- программное обеспечение управления архивными данными IBM *Tivoli Storage Manager* (TSM).



Рис. 2. Миграция гидрометеорологической информации в ААС

Обеспечение долговременного хранения ААС способна выполнять и по сей день за счет своей аппаратной составляющей – роботизированной ленточной библиотеки, так как сегодняшний день лента остается наиболее подходящим выбором для долговременного хранения архивной информации и обеспечения бэкапа. Однако, как уже было сказано, основная проблема – это управление объектами хранения в ААС.

Во-первых, для управления контентом ААС используется ПО TSM. TSM – это программный комплекс, обеспечивающий решение задач долговременного хранения данных, позволяющий произвести автоматическое восстановление копии в случае потери данных. Все процессы TSM автоматизированы. Автоматизация этих процессов обеспечивается за счет управления данными на основе политик и возможности восстановления сервера TSM после аварийных ситуаций, приводящих к физической потере данных либо самого сервера. Основные функции TSM:

- управление автоматизированной системой хранения;
- создание резервных копий данных;
- архивирование данных;
- восстановление данных;
- выполнение функций автоматизации, составления отчетов и мониторинга;
- реализация политик управления;
- хранение в реляционной базе данных TSM информации об объектах хранения.

Таким образом, с точки зрения хранения, создания резервной копии, существующее ПО выполняет свою функцию. Основным же недостатком TSM является тот факт, что управление объектами хранения (рис. 3), в части их учета и поиска, организовано с привлечением специалистов (администратора и операторов ААС) и дополнительных средств, не связанных с TSM. Например, система учета реализована с помощью MS Excel, который содержит своего рода базу метаданных, описывающую объекты хранения.

Функционал интерфейса каталожной структуры TSM не может предоставить удаленный доступ к гидрометеорологическим документам ААС всем заинтересованным пользователям, что ограничивает распространение данных гидрометеорологических наблюдений среди общества. Также, на текущий момент поиск организован методом визуального просмотра каталожной структуры, что значительно замедляет время предоставления объектов хранения, а следовательно, и время обслуживания гидрометеорологической информацией и продукцией пользователей.

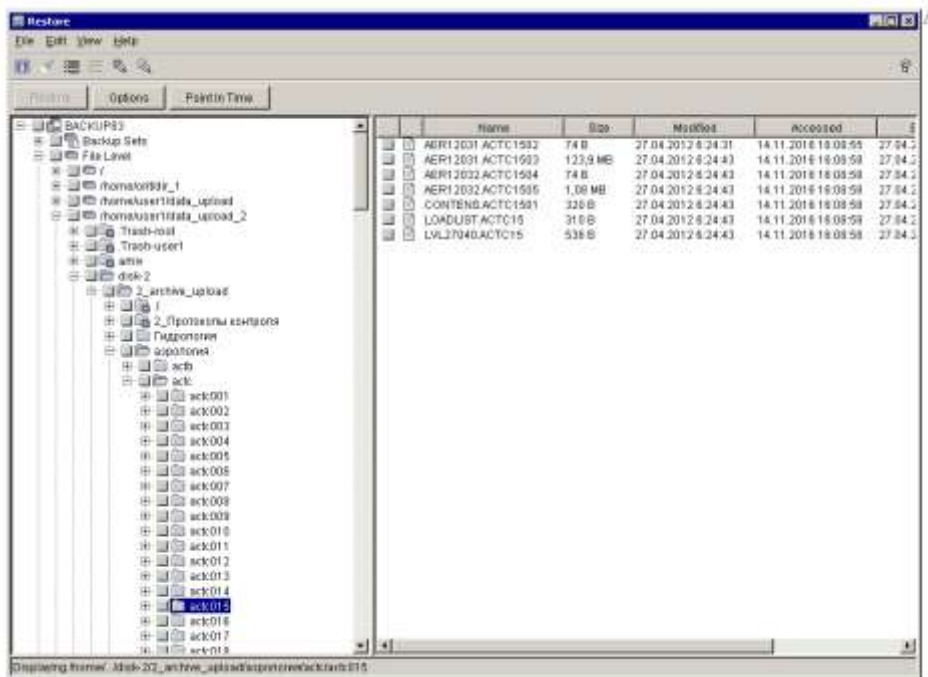


Рис. 3. Интерфейс каталожной структуры TSM

Во-вторых, время доступа к файлам в роботизированной ленточной библиотеке достаточно длительное. Это обусловлено тем, что в иерархии памяти (рис. 4) время доступа к магнитным накопителям самое большое, т. е. при увеличении объема памяти увеличивается и время доступа.



Рис. 4. Иерархия памяти

В связи с этим, для оперативной работы с наиболее востребованными документами Госфонда Росгидромета (оперативным архивом) необходимо отдельное хранилище, синхронизированное с ИС и базовым архивом в роботизированной библиотеке, обладающее быстрым типом памяти.

На этом анализ исходного состояния информационной системы архивного хранения Госфонда Росгидромета завершен и можно перейти к предложениям по модернизации.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ

Прежде чем, перейти к формированию предложений по модернизации, нужно отметить, что попытки решения описанной в предыдущем разделе актуальной проблемы уже предпринимались и опубликованы в работах [15–18], однако практической реализации и внедрения так и не достигли. Несмотря на то, что идеи, предложенные в этих трудах, обоснованы и логичны, работы были опубликованы достаточно давно, в период с 2013 по 2014 г. В связи с этим, имеет смысл учесть предыдущий опыт и актуализировать выдвигаемые предложения по созданию и развитию ИС хранения Госфонда Росгидромета в соответствии с существующими на сегодняшний день требованиями к формированию Госфонда Росгидромета, а также с достигнутым прогрессом в области информационных технологий.

Первое с чего стоит начать – это выделить качественные характеристики (метрики), ради чего мы модернизируем действующую систему. Ведь необходимо понимать, что компьютеризация не всегда приводит к автоматизации процессов. Здесь требуется уточнить, в чем преимущество? Например, в минимизации времени получения запрашиваемой информации из Госфонда Росгидромета или надежности хранения.

Далее выделить подсистемы и определить для каждой из них функционал. На данный момент можно выделить следующие подсистемы:

- подсистема сбора и регистрации;
- подсистема обработки;
- подсистема учета;
- подсистема хранения;
- подсистема обслуживания;
- подсистема статистики и отчетов;
- подсистема администрирования.

Такой подход дает возможность распределить функционал по группам с целью разбиения глобальной задачи на части, в рамках которых можно более детально определить конкретные функциональные требования, предъявляемые к системе. По сути это стандартная классификация, независимая от информации и информационных процессов предметной области.

Следующим шагом необходимо исследовать нормативную базу формирования Госфонда Росгидромета и рекомендаций Росархива и ВНИИДАТ [19] в части ведения электронных архивов, которая не учитывалась в предыдущих исследованиях. Это даст понимание о составе и структуре объектов хранения и связанных с ними информационных потоках, тем самым позволив правильно сформировать базовый архив ААС. Под базовым архивом понимается перечень документов, подлежащих хранению в Госфонде Росгидромета в том виде, в котором они поступили, поскольку основной принцип архивного хранилища – «хранить то, что поступило», т. е. любой документ, принятый в Госфонд Росгидромета, должен становиться объектом бессрочного хранения. В свою очередь это может привести к тому, что в гидрометеорологических документах могут быть как синтаксические, так и семантические ошибки, что делает невозможным использовать эти документы для обслуживания потребителей. Поэтому в течение времени информация в таких документах уточняется, дополняется и повторно направляется в Госфонд Росгидромета для хранения. Такие данные уже можно использовать для работы и на их основе формировать производный, оперативный архив, размещенный на ресурсах с быстрым типом памяти, для повышения качества обслуживания пользователей.

После исследования нормативной базы и формирования базового архива, следует перейти к анализу информационных процессов сбора, обработки, хранения, передачи и предоставления гидрометеорологической информации для того, чтобы выделить тип новой ИС, которая реализуют информационную технологию, например ECM, MRP или ERP системы.

Далее необходимо проанализировать рынок готовых предложений по ИС и зарубежный опыт по формированию аналогичных фондов данных.

Определив класс ИС, скорее всего это будет ЕСМ система, для управления (добавления, редактирования и поиска) объектами хранения нужно разработать модель метаданных, которая бы описывала объекты хранения (документы Госфонда Росгидромета) с целью централизованного управления. Разработанная в [16] модель метаданных, достаточно хорошо идентифицирует объекты хранения в общем смысле, однако не учитывает некоторые детали, например, нет поля «вид представления» (справочник, ежемесячник, ежегодник и т. д.), который в разы увеличивает точность поисковой выдачи сканированных копий бумажных документов. Таким образом, существующую модель метаданных нужно доработать, учтя особенности документов Госфонда Росгидромета и опираясь на отечественные и международные стандарты, а также использовать опыт разработки модели метаданных АС ЭФОД, после чего внедрить в основу новой ИС.

Разработав модель метаданных, нужно минимизировать ошибки при создании описаний объектов хранения. Возможным вариантом является стандартизация значений атрибутов, т. е. нужно составить тематические словари (тезаурусы) для как можно большего числа атрибутов модели метаданных.

Переходя к этапу разработки, следует предварительно смоделировать процессы, протекающие в новой ИС, для получения значений характеристик качества выполнения процессов формирования Госфонда Росгидромета до модернизации и после. Убедившись в правильности действий, перейти к выбору техник и технологий для разработки ИС.

Таким образом, для решения проблемы управления гидрометеорологическими документами в ААС были обоснованы, сформулированы и представлены следующие предложения для реализации новой ИС:

- проанализировать нормативную базу и информационные потоки, в соответствии с которыми формируется Госфонд Росгидромета;
- исходя из проведенного анализа, рассмотреть рынок современных информационных систем (ERP, ЕСМ, MRP и т. д.) и выделить соответствующий класс для реализации технологии формирования и управления Госфондом Росгидромета, учитывая специфику гидрометеорологической информации;
- на основе нормативной базы сформировать реестр гидрометеорологических документов Госфонда Росгидромета (объектов хранения ААС) с целью создания базового архива и оперативного (рабочего архива);
- разработать политику управления процессами формирования и использования объектов хранения ААС, выделить роли пользователей и их функции;
- разработать каталожную структуру хранения документов и расширить аппаратную часть ААС в плане хранилища с быстрым типом памяти для обслуживания потребителей гидрометеорологическими документами рабочего архива;
- доработать существующую модель метаданных, характеризующих гидрометеорологические документы;
- разработать тематические словари для стандартизации атрибутов модели метаданных;
- разработать модель (математическую), имитирующую процессы формирования и управления Госфондом Росгидромета для оценки метрик (времени доступа, надежности системы и т. д.) до и после модернизации, а также понимания процесса дальнейшего развития ИС;
- разработать ИС хранения Госфонда Росгидромета, реализующую ролевое удаленное управление объектами хранения, используя современные телекоммуникационные и программно-аппаратные средства;
- развернуть ИС на ресурсах ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и ввести в оперативную эксплуатацию.

Исходя из выше сказанного, предполагается, что по завершению реализации мероприятий получится функциональная схема модернизированной ИС хранения Госфонда Росгидромета (рис. 5), способная решать весь спектр поставленных перед ней задач.

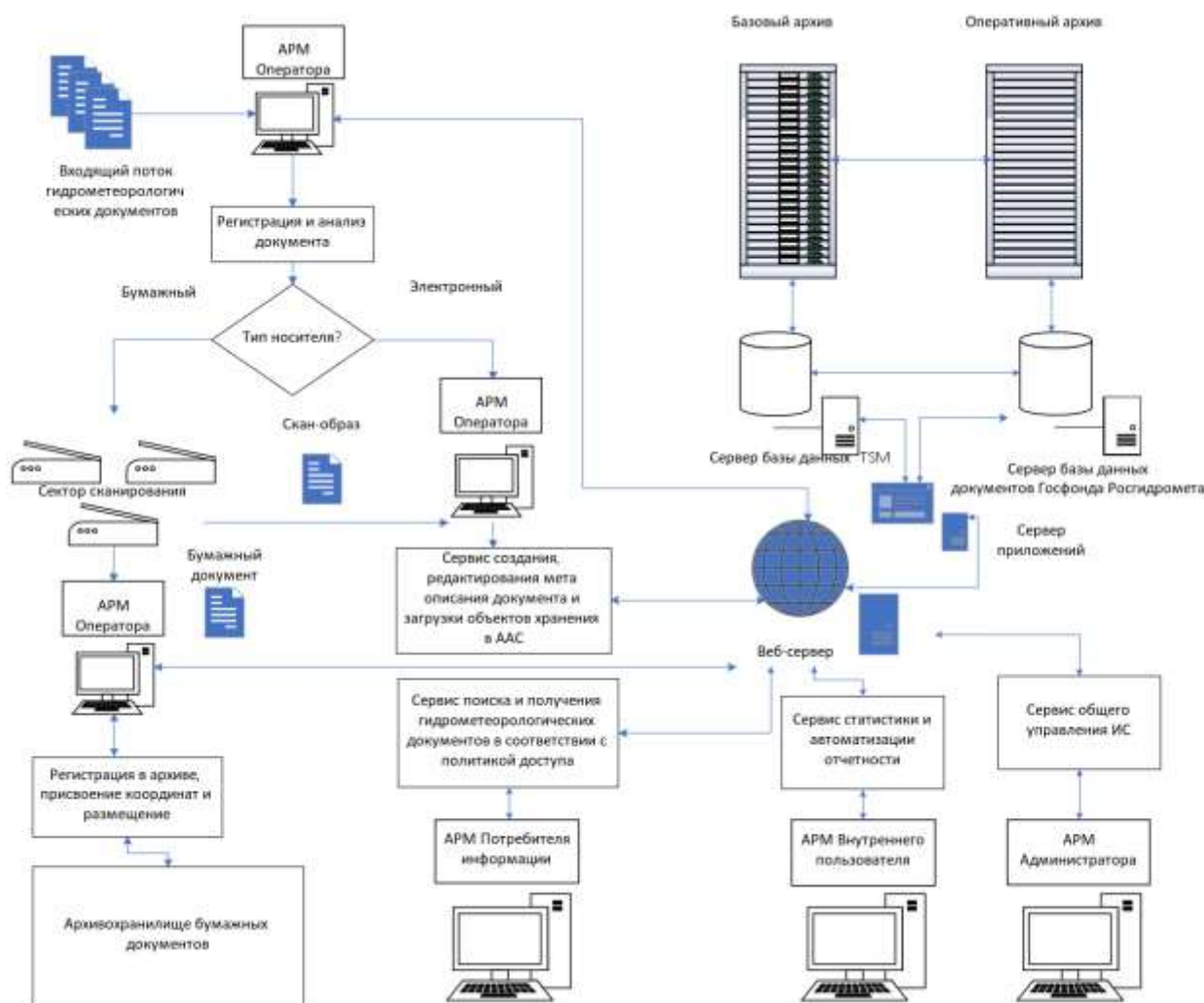


Рис. 5. Функциональная схема модернизированной ИС хранения Госфонда Росгидромета

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующая ИС хранения Госфонда Росгидромета не отвечает современным требованиям ряда моментов, например, удаленному управлению, централизованному учету гидрометеорологических документов и возможностям более качественного обслуживания потребителей в части времени доступа к гидрометеорологической информации для использования в различных сферах деятельности.

Эта актуальная проблема требует серьезного анализа и модернизации существующих алгоритмов, методов и технологий с привлечением соответствующих специалистов в области гидрометеорологии и информационных технологий (администраторов, операторов, программистов, специалистов по гидрометеорологии и смежных с ней областям).

В связи с этим, предложенный в настоящей работе план развития ИС предполагает решение всех обозначенных проблем управления информационными потоками сбора, обработки, хранения, передачи и предоставления гидрометеорологической информации Госфонда Росгидромета.

Список используемых источников

1. *Шаймарданов М. З., Пуголовкин В. В.* Государственный фонд данных по гидрометеорологии и загрязнению природной среды. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. – 117 с.
2. Концепция модернизации архивной системы Мирового метеорологического центра / М. З. Шаймарданов [и др.] // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2007. – Вып. 172. – С. 3–37.
3. *Николаев Е. А., Шаймарданов В. М.* Развитие архивной системы Росгидромета // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2010. – Вып. 174. – С. 3–10.
4. *Шаймарданов В. М.* Развитие архивной системы данных о состоянии окружающей природной среды на базе современных технических средств // Труды ГГО. – 2011. – Вып. 563. – С. 179–190.
5. *Шаймарданов М. З., Пуголовкин В. В.* Автоматизированные системы и технологии сбора, обработки и накопления данных гидрометеорологических наблюдений. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 226 с.
6. РД 52.19.143 – 2019. Перечень документов архивного фонда данных о состоянии окружающей среды, её загрязнении. – Обнинск, 2020. – 107 с.
7. РД 52.19.704 – 2013. Перечень документов архивного фонда данных о состоянии окружающей среды, её загрязнении. – Обнинск, 2013. – 88 с.
8. *Веселов В.М.* Язык описания гидрометеорологических данных // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 1978. – Вып. 43. – С. 3–30.
9. *Прибыльская И. Р.* Язык описания гидрометеорологических данных для семейств файлов // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 1983. – Вып. 103. – С. 3–9.
10. *Веселов В. М.* Язык описания гидрометеорологических данных для IBM PC совместимых ПЭВМ // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 1995. – Вып. 160. – С. 41–54.
11. *Шаймарданов В. М.* Обеспечение сохранности данных, накопленных на бумажных носителях, и организация обслуживания // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2011. – № 563. – С. 191–196.
12. *Шаймарданов В. М., Колесников А. Е.* Технология оцифровки данных с бумажных носителей // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2012. – № 566. – С. 234–245.
13. *Колесников Е. В., Шаймарданов В. М.* Создание автоматизированной информационной технологии сканирования бумажных документов Росгидромета // Успехи кибернетики. – 2022. – Т. 3. – № 1. – С. 28–38.
14. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2021621423 РФ. Электронный фонд отсканированных гидрометеорологических документов / Е. В. Колесников, В. М. Шаймарданов; заявитель ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных». – № 2021621105; заявл. 31.05.2021; опубли. 01.07.2021.
15. *Долгих С. Г., Шаймарданов В. М.* Разработка системы автоматизированного управления фондом гидрометеорологических данных архивной системы Росгидромета // Материалы научной конференции ITS. – Минск, 2013. – С. 28–29.
16. *Долгих С. Г., Шаймарданов В. М.* Создание технологии управления данными в автоматизированной архивной системе // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2014. – № 572. – С. 162–174.
17. *Долгих С. Г., Шаймарданов В. М.* Развитие технология управления данными в автоматизированной архивной системе // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2014. – № 575. – С. 204–214.
18. *Шаймарданов В. М., Шаймарданов М. З.* Развитие автоматизированной архивной системы Росгидромета // Ученые записки РГГМУ. – 2014. – № 36. – С. 60–66.
19. Рекомендации по комплектованию, учету и организации хранения электронных архивных документов в государственных и муниципальных архивах. – М.: ВНИИДАД, 2013. – 49 с.

А. А. Кори́стин,
кандидат технических наук;
Ю. В. Кулешов,
доктор технических наук, профессор

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СРЕДСТВ

Выполнено обобщение имеющихся в литературе сведений о влиянии атмосферы на радиолокационные и радионавигационные системы и средства, а также сведений о возможностях компенсации этого влияния. Проведен сравнительный анализ эффективности компенсации влияния среды с точки зрения теории синтеза специализированных методов диагностирования и прогнозирования геофизических условий. Выявлены проблемные вопросы, и обоснованы дальнейшие перспективы развития системы геофизического обеспечения применения радиолокационных и радионавигационных систем и средств.

Ключевые слова: геофизическое обеспечение, диагностика геофизических условий, эффективность радиолокации, эффективность радионавигации, влияние атмосферы на радиотехнические системы, модели ионосферы, ионосферные наблюдения.

ВВЕДЕНИЕ

Существенное влияние среды распространения радиоволн на эффективность функционирования радиолокационных и радионавигационных систем и средств требует учета данного фактора в ходе их применения. Для учета используется оперативная информация о состоянии среды, получаемая главным образом с помощью моделей среды, в том числе корректируемых по данным текущих наблюдений ее состояния. Степени влияния эффектов распространения радиоволн в среде на качество выполнения задач различными радиотехническими системами (РТС) и на эффективность учета такого влияния будут различными. По аналогии с используемым в прикладной гидрометеорологии понятием «гидрометеорологическое обеспечение» обеспечение указанных РТС необходимой информацией о состоянии среды распространения радиоволн целесообразно называть геофизическим обеспечением. Определение проблемных вопросов и направлений дальнейшего развития существующей системы геофизического обеспечения РТС требует проведения сравнительного анализа эффективности геофизического обеспечения различных РТС и выявления основных причин ее снижения.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Функционирование радиолокационных и радионавигационных систем и средств (далее – радиотехнических систем) происходит в условиях влияния среды распространения радиоволн вследствие наличия эффектов рефракции, отражения, поглощения, рассеяния, запаздывания, деполяризации и др. Степень проявления этих эффектов зависит в основном от применяемого диапазона радиоволн, а также от свойств среды распространения. По степени зависимости от этих свойств условно выделяют две группы РТС [37].

К первым относятся радиотехнические системы, принцип функционирования которых основан на использовании свойств среды распространения радиоволн. Для таких систем влия-

ние среды на радиосигнал является необходимым условием их функционирования. Это системы, работающие, как правило, в диапазонах длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) радиоволн. Основное влияние на применение этих систем оказывает ионосфера – слой атмосферы, обладающий специфическими радиофизическими свойствами, ввиду наличия большого количества свободных электронов и ионов.

Ко вторым относятся радиотехнические системы, для которых среда распространения радиоволн – это лишь источник помех и ее наличие не является необходимым условием функционирования таких систем. Это системы диапазона ультракоротких длин волн (УКВ). На применение систем данной группы оказывают влияние как ионосфера, так и нейтральные слои атмосферы, сосредоточенные чаще всего в пределах тропосферы. При этом с увеличением рабочей частоты радиотехнических систем влияние ионосферы на их работу уменьшается по сравнению с влиянием нейтральных слоев [7].

Вместе с тем развитый в материалах работы [24] подход к синтезу специализированных методов диагностирования геофизических условий в атмосфере позволяет произвести сравнительный анализ влияния среды на степень достижения целей функционирования РТС различного типа. С позиций, определенных в [19, 24], РТС можно рассматривать как целеустремленные системы (ЦУТС). Тогда зависимость эффективности $P_{ВЗ}$ их применения от состояния среды распространения радиоволн определяется не только степенью проявления радиофизических эффектов. Важную роль играет соотношение последствий влияния этих эффектов и заданных требований Y^{TP} к результатам Y их применения. В ходе опытно-конструкторских работ, посвященных разработке РТС, эти требования реализуются в номинальных тактико-технических характеристиках A' РТС конкретных типов [1, 3, 25], которые, в свою очередь, определяются расчетно-эмпирическим путем [11] с учетом некоторых характерных условий влияния среды B'' . В качестве последних, как правило, используются значения различных параметров среды, полученные на основе анализа многолетних наблюдений и представляющие собой, в совокупности, климатические геофизические условия B'' применения РТС. Иными словами, в данном случае $A' = A'(B'')$.

В конкретный же период применения РТС состояние среды распространения радиоволн определяется совокупностью наблюдаемых в этот период геофизических параметров и представляет собой фактические геофизические условия B' применения РТС, которые могут существенно отличаться от климатических B'' . Данный факт обуславливает отклонение фактических результатов Y применения РТС от требуемых Y^{TP} , учтенных в тактико-технических характеристиках РТС.

Геофизические условия (ГФУ) – это состояние геофизических факторов, оказывающих влияние на процесс функционирования РТС и его исход.

В дальнейшем под геофизическими условиями будем понимать именно фактические геофизические условия B' . Для того чтобы сравнить результаты $Y(A, B')$ применения различных РТС в определенных ГФУ и выделить среди РТС наиболее зависимые от ГФУ с учетом предъявляемых к ним требований, необходим универсальный показатель эффективности применения систем. Таким показателем, согласно теории эффективности целенаправленных процессов [19], является вероятность $P_{ВЗ}$ выполнения решаемой задачи.

Одной из задач, решаемых в ходе применения радионавигационных и радиолокационных систем, является определение координат объектов с заданной точностью. Механизмы влияния эффектов распространения радиоволн в среде на точность определения координат объектов связаны с особенностями обработки радиосигнала в РТС.

Первый механизм влияния проявляется через увеличение погрешностей измерения параметров принятого радиосигнала, несущих координатную информацию об объекте, за счет снижения уровня сигнала на фоне помех. Компенсация влияния в этом случае достигается путем селекции помех и управления параметрами зондирующего сигнала.

Второй – это влияние через погрешности местоопределения объекта по значениям параметров принятого сигнала. Во втором случае причиной возникновения погрешностей является неадекватность моделей, связывающих параметры принятого сигнала с координатами объекта. Уменьшение погрешностей местоопределения достигается путем коррекции моделей по заранее известным свойствам среды распространения радиоволн. Сопоставление теоретических и эмпирических оценок [1, 3, 7, 9, 10, 14, 38] влияния среды на точность определения координат объектов свидетельствует о том, что именно погрешности местоопределения вносят наибольший вклад в ухудшение точности.

Полагая требования к точности измерения параметров принятого сигнала выполненными за счет его оптимальной обработки и выбора параметров зондирующего сигнала, а ресурсоемкость y_2 и оперативность y_3 задачи определения координат объектов – независимыми от свойств среды ($y_2 = \text{const}$, $y_3 = \text{const}$), в качестве показателя эффективности $P_{ВЗ}$ определения координат цели можно выбрать вероятность выполнения требований к значениям погрешностей y_1 местоопределения.

Требования к погрешностям местоопределения с помощью РТС задаются в виде требуемых значений $\sigma_{\text{тр}}$ среднеквадратических ошибок определения координат, полагая закон распределения ошибок нормальным с нулевым средним. Таким образом, абсолютное значение максимально допустимой погрешности $|\delta_{\text{тр}}| \equiv Y^{\text{TP}}$ можно определить как утроенное значение требуемой среднеквадратической ошибки $|\delta_{\text{тр}}| \approx 3\sigma_{\text{тр}}$, в пределах которого с высокой долей вероятности должны находиться значения погрешности местоопределения.

Если допустить, что возникающие, вследствие влияния среды, неучтенные случайные погрешности $\hat{\delta} \equiv \hat{Y} = \hat{y}_1$ местоопределения являются несмещенными и распределены также по нормальному закону, что в большинстве случаев справедливо ввиду многофакторности такого воздействия, то при известных среднеквадратических значениях σ_{δ} погрешностей в заданных геофизических условиях можно приближенно оценить вероятность выполнения в этих условиях заданных к РТС требований точности местоопределения:

$$P_{ВЗ} = P(\hat{Y} < Y^{\text{TP}}) = P(-\delta_{\text{тр}} \leq \hat{\delta} < \delta_{\text{тр}}) = 2P(\hat{\delta} < \delta_{\text{тр}}) - 1 = 2\Phi\left(\frac{\delta_{\text{тр}}}{\sigma_{\delta}}\right) - 1, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{тр}}$ – требуемое значение максимальной погрешности определения координат;
 $\hat{\delta}$ – неучтенная наблюдаемая случайная погрешность определения координат;
 $\sigma_{\text{тр}}, \sigma_{\delta}$ – требуемая и наблюдаемая среднеквадратические ошибки определения координат соответственно;
 Φ – интегральная функция стандартного нормального распределения.

Указанная вероятность в данном случае будет являться показателем эффективности применения РТС конкретного типа в заданных геофизических условиях для решения задач местоопределения (табл. 1).

Анализ соответствия требуемым значениям представленных в различных публикациях [1, 3, 4, 7–10, 14, 18, 25, 26, 42] оценок влияния среды распространения радиоволн на некоторые показатели качества функционирования РТС (табл. 1) различных видов и диапазонов показывает, что наименее чувствительны к влиянию среды радиолокационные станции дециметрового диапазона, поскольку характерные требования к качеству функционирования систем этого типа, реализованные в их тактико-технических характеристиках, сопоставимы с результатами влияния среды. Эффективность их применения в условиях влияния среды распространения радиоволн близка к единице (с учетом округления до сотых долей). Таким образом, влияние среды распространения радиоволн на эффективность применения радиолокационных и радионавигационных систем и средств определяется состоянием среды и требованиями к результатам их применения. Наиболее подвержены влиянию среды спутниковые радионавигационные системы и радиолокационные станции декаметрового диапазона длин волн.

Таблица 1

Эффективность выполнения РТС задач местоопределения в условиях влияния среды распространения радиоволн

Тип РТС	Показатель качества результатов функционирования	Требуемое значение $\sigma_{тр}$	Значение σ_{δ} в условиях влияния среды	Эффективность $P_{вз}$ местоопределения (удовлетворения требований)
Глобальные спутниковые радионавигационные системы	Погрешность определения местоположения с помощью функционального дополнения, м	0,1–1,0	3,0–11,0	0,02–0,68
Радиолокационные станции дециметрового диапазона	Погрешность определения угла места, градус	0,25	0,10–0,20	1,00
	Погрешность определения азимута, градус	0,25	0,10–0,20	1,00
	Погрешность определения дальности, м	250	100–200	1,00
Радиолокационные станции метрового диапазона	Погрешность определения угла места, градус	0,83	0,30–0,50	1,00
	Погрешность определения азимута, градус	0,17	0,50–0,70	0,53–0,69
	Погрешность определения дальности, м	1000	800–1500	0,95–1,00
Радиолокационные станции декаметрового диапазона	Погрешность определения азимута, градус	0,3–1,0	1,0–3,0	0,24–1,00
	Погрешность определения дальности, км	5–15	20–200	0,06–0,98

В зависимости от полноты имеющейся информации о закономерностях влияния среды на точность местоопределения такое влияние носит как регулярный, так и стохастический характер. Влияние, имеющее регулярный характер, может быть скомпенсировано в процессе функционирования РТС и учтено при их проектировании. Для оперативного оценивания и компенсации регулярного влияния среды на РТС в них предусмотрены специальные алгоритмические комплексы, включающие модели среды, которые могут быть скорректированы по данным текущих наблюдений. Эти алгоритмические комплексы вместе со средствами наблюдений и составляют в настоящее время основу системы оперативного учета влияния среды на РТС. Одной из основных задач данной системы является обеспечение этих РТС информацией о состоянии среды распространения радиоволн, необходимой для выполнения ими задач по предназначению с требуемым качеством (эффективностью). В области гидрометеорологии комплекс мероприятий, нацеленных на решение задачи обеспечения потребителей необходимой информацией о состоянии атмосферы, называется гидрометеорологическим обеспечением (обслуживанием) [27]. По аналогии комплекс мероприятий, нацеленных на решение задачи обеспечения РТС необходимой информацией о состоянии среды распространения радиоволн, целесообразно называть геофизическим обеспечением (ГФО) радиолокационных и радионавигационных систем и средств. Поскольку ГФО нацелено на обеспече-

ние функционирования РТС с требуемым качеством (выполнение задачи с вероятностью, близкой к единице), то характеристикой качества (эффективности) ГФО будет являться отношение приращения эффективности функционирования РТС за счет ГФО к требуемому приращению для практически полного исключения влияния среды. Поскольку ГФО РТС реализуется с помощью средств наблюдений и моделей среды, то их характеристики будут в значительной мере определять качество ГФО РТС. Сами модели и средства наблюдений в их взаимосвязи будут представлять собой элементы системы ГФО РТС.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Модели среды, используемые в алгоритмических комплексах РТС, могут иметь различную сложность и, как и все модели, не являются идеальными. Адекватность этих моделей различна. В целях ее повышения некоторые модели могут быть скорректированы по данным оперативных наблюдений за состоянием среды. Такие модели называют ассимиляционными, и в настоящее время они считаются наиболее перспективными для использования в оперативном режиме, приближенном к режиму реального времени. Важно отметить, что в настоящее время существуют модели, отражающие изменения состояния среды как под воздействием естественных факторов, так и антропогенных. Для дальнейшего анализа интерес в первую очередь представляют модели, отражающие естественное состояние среды, поскольку от этого состояния, в свою очередь, зависит степень проявления эффектов искусственного воздействия.

В глобальных спутниковых радионавигационных системах (СРНС) используются различные эмпирические модели нейтральных слоев атмосферы (Хопфилда, Саастамойнена и др.), предполагающие коррекцию по данным приземных метеорологических наблюдений (МН) температуры воздуха, атмосферного давления и парциального давления водяного пара [38]. В случае отсутствия учета влияния нейтральных слоев, погрешности определения вертикальной координаты могут достигать величин порядка 9 м [18]. После компенсации с помощью моделей тропосферы остаточная ошибка составляет порядка 10–15 см, данные значения по величине сопоставимы с составляющей ошибки, обусловленной водяным паром [46]. Для более тонкого учета профиля влажности вдоль трассы и компенсации составляющей ошибки, обусловленной водяным паром, используются радиометры водяного пара (РВП), что позволяет в некоторых случаях уменьшить остаточную погрешность до величин порядка 1,0 см и менее. В итоге использование модели нейтральных слоев атмосферы позволяет практически полностью (более чем на 95%) исключить тропосферную составляющую погрешности.

Ионосферная составляющая погрешности позиционирования является более значительной и в случае полного отсутствия учета может достигать значений более десятка метров. Для учета влияния ионосферы используются эмпирические модели ионосферы, например: модель Клобучара, модель *NeQuick*, а также построенные на их основе ассимиляционные модели, предполагающие коррекцию по данным измерений полного электронного содержания (ПЭС) на наклонных трассах с помощью радиопросвечивания ионосферы сигналами спутниковых радионавигационных систем.

По известным данным [50], за счет применения модели Клобучара достигается уменьшение погрешности на 16–50%, за счет используемой в ГНСС *Galileo* модели *NeQuick* – на 31–55%.

Кроме того, для учета влияния ионосферы используются карты полного электронного содержания, такие как US-TEC, GIM и др. Карты также строятся с использованием ассимиляционных моделей ионосферы и данных радиопросвечивания ионосферы сигналами спутниковых радионавигационных систем.

Карты US-TEC строятся с помощью модели ионосферы [29], представляющей собой аппроксимацию вертикального профиля концентрации электронов в виде разложения в ряд по естественным ортогональным функциям из модели ионосферы IRI-95 [31]. По данным из работы [29], использование карт US-TEC в 2004 г., в период минимума солнечной активности, позволило уменьшить погрешности определения ПЭС на трассе до 2-3 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16}$ электрон/м²), что эквивалентно ошибке определения псевдодальности 0,5 м, с учетом того, что 1 TECU на частотах, применяемых в СРНС, эквивалентен величине порядка 0,16 см. Модель IRI [31] в этих же условиях позволила уменьшить погрешности до 4–8 TECU, что эквивалентно ошибке определения псевдодальности 1,0–2,0 м.

Использование карт GIM, построенных с помощью однослойной модели ионосферы, позволило достичь уменьшения погрешности определения ПЭС на трассе до значений 10–15 TECU, что эквивалентно ошибке определения псевдодальности 1,6–2,4 м, в период минимума солнечной активности с 1998 по 2009 г. [40].

В периоды высокой солнечной активности указанные ошибки определения ПЭС возрастают в 3-4 раза и могут достигать значений более 20–35 TECU [43], что эквивалентно 3 м. Таким образом, используемые модели ионосферы позволяют повысить точность позиционирования на 50–70%.

В радиолокационных станциях (РЛС) УКВ диапазона основное влияние на погрешность определения угловых координат оказывают нейтральные слои атмосферы [7]. Для компенсации этого влияния используются, как правило, полуэмпирические модели нейтральных слоев сферически слоистой атмосферы на основе аналитической экспоненциальной зависимости индекса преломления от высоты [4]. При этом форма вертикального профиля индекса преломления определяется его значением у поверхности Земли, которое, в свою очередь, зависит от температуры, давления и влажности воздуха. Таким образом, модель корректируется по текущим данным метеорологических наблюдений. Составляющая погрешности по углу места вследствие влияния нейтральной составляющей атмосферы может достигать величин порядка $0,2\text{--}0,3^\circ$, а по дальности – от 50 до 100 м для углов места целей $\theta_{ц} = 3\div 5^\circ$ на дальностях более 200 км [8].

Главным недостатком используемых аналитических моделей нейтральных слоев атмосферы является предположение сферически слоистой среды, которое не позволяет учесть горизонтальные неоднородности показателя преломления, значение горизонтальной составляющей градиента показателя преломления в используемых моделях полагается равным нулю. Кроме того, в приземном слое могут наблюдаться инверсии температуры и изотермия, которые обуславливают отклонение вертикального профиля показателя преломления от экспоненциального.

Суточные вариации вертикальной составляющей градиента относительно модельных значений в вертикальном слое атмосферы от 0 до 3 км при прохождении атмосферного фронта способны вызвать погрешности определения угла места до $0,05^\circ$ при углах места цели $\theta_{ц} = 3\div 5^\circ$. Наличие горизонтальных составляющих градиента показателя преломления приводит к погрешностям определения азимута до $0,10^\circ$, не учитываемым экспоненциальной моделью, на углах места цели $\theta_{ц} = 2,5^\circ$ [7]. Неучтенные погрешности по дальности составляют порядка единиц метров [4]. Таким образом, экспоненциальная модель нейтральных слоев атмосферы позволяет компенсировать от 30 до 80% погрешности по угловым координатам и более 90% – по дальности.

Основной вклад в погрешность измерения дальности целей на высотах более 250 км вносит ионосфера [7]. В алгоритмах компенсации ионосферных погрешностей используются, как правило, региональные эмпирические ассимиляционные модели ионосферы, построенные по данным многолетних наблюдений, отражающие по аналогии с моделями IRI [31] и SIMP [12] закономерности изменения месячных медианных значений параметров ионосферы. Коррекция этих моделей осуществляется по данным ПЭС с помощью радиопросвечивания (трансионосферного зондирования) сигналами СРНС. Показано в работе [15], что в РЛС

дециметрового диапазона уменьшение ионосферной ошибки определения угла места за счет корректируемых эмпирических моделей ионосферы составило около 60%, а уменьшение ионосферной ошибки определения дальности – порядка 70%. В РЛС метрового диапазона величина поправок к дальности, полученных на основе модели IRI-2012 [31], составила от 80 до 90% общей ошибки [10].

Радиолокационные станции КВ диапазона являются наиболее подверженным влиянию среды видом РТС. Вследствие особенностей распространения используемого диапазона длин волн, влияние ионосферы на данные станции значительно превышает влияние нейтральных слоев. Ионосферные погрешности в десятки и сотни километров не сопоставимы с погрешностями величиной до 100 м, обусловленными нейтральной составляющей атмосферы. В связи с этим учет влияния среды в этих станциях сводится к адаптации параметров функционирования станции к текущему состоянию ионосферы. В основе алгоритмов адаптации лежат региональные эмпирические и теоретические (физически обусловленные) модели ионосферы, применение средств возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВНЗ), а также использование дополнительных данных вертикального, наклонного зондирования, радиопросвечивания (РП) ионосферы сигналами СРНС и данных наблюдений с помощью космических аппаратов. В РЛС КВ диапазона ОTH-B (США), например, используется теоретическая динамическая модель ионосферы PRISM [32, 47], построенная в виде массива данных, полученных с помощью численного решения уравнений динамики ионосферной плазмы для разных широтных областей и представления вертикального профиля концентрации электронов в виде ряда по естественным (эмпирическим) ортогональным функциям для задания начальных условий по аналогии с рассмотренной ранее US-TEC. В РЛС КВ диапазона JORN (Австралия) применяется эмпирическая статическая модель RTIM [30] в виде набора вертикальных параболических слоев на географической сетке, аппроксимирующих в ее узлах вертикальные профили концентрации электронов, параметры каждого из которых уточняются по результатам усвоения данных текущих наблюдений за ионосферой различными средствами. В указанных РЛС активно используются данные сетей вертикального (ВЗ) и наклонного (НЗ) зондирования ионосферы, включающих более десятка станций, а также данные контактных измерений (КИ), УФ-спектрометрии (УФ-С) с помощью космических аппаратов и радиопросвечивания ионосферы сигналами СРНС [30, 32, 47]. В некоторых случаях используются эмпирические региональные модели, аналогичные модели IRI, на основе коэффициентов CCIR или URSI пространственно-временного разложения поля среднемесячных значений параметров слоев ионосферы по сферическим функциям. Эмпирические модели адаптируются к текущим геофизическим условиям варьированием входными параметрами модели (индексами солнечной и магнитной активности), а также корректируются в локальных областях по данным наблюдений с помощью весовых функций различного вида, компенсирующих невязку модели и реальных данных наблюдений [14].

Результаты использования эмпирических моделей типа SIMP, IRI, GPSII и др. показывают [1, 9, 14, 36] недостаточную их гибкость и адекватность. При описании реальных полей концентрации электронов причинами ошибок могут быть как неадекватные аппроксиманты, связывающие параметры модели (например, концентрацию электронов на различных высотах), так и неадекватные значения самих параметров.

По некоторым оценкам [9], медианная ошибка по дальности вследствие неадекватности аппроксимации вертикального профиля концентрации электронов при точно заданных его основных параметрах (высотах максимумов слоев ионосферы, значениях концентрации в максимумах слоев) составила 12–15 км, а максимальная – 90–160 км.

Оценки среднеквадратических погрешностей определения дальности вследствие неадекватности задания основных параметров вертикального профиля концентрации электронов составили до 16 км при относительных среднеквадратических ошибках определения параметров профиля 5% и до 60 км при ошибках в параметрах профиля до 15% [14].

Учитывая, что относительные среднеквадратические погрешности определения параметров слоев ионосферы (например, высот максимумов) с использованием ассимиляционной эмпирической модели могут достигать величин порядка 10–15% [35], и принимая во внимание среднеквадратические ошибки аппроксимации вертикального профиля концентрации электронов, можно оценить суммарную неучтенную среднеквадратическую ошибку определения дальности как корень суммы квадратов этих ошибок. Величина неучтенной суммарной ионосферной среднеквадратической ошибки равна 35–65 км, что составляет порядка 40% от значений полной возможной ионосферной ошибки определения дальности.

Таким образом, учет влияния среды на РТС с помощью моделей в процессе ГФО показывает общее уменьшение среднеквадратической ошибки на величину от 60 до 90% для различных систем (табл. 2).

Таблица 2

Приращение эффективности выполнения РТС задач местоопределения в условиях влияния среды распространения радиоволн при ГФО

Тип РТС	Учет влияния нейтральных слоев атмосферы	Учет влияния ионосферы	Результат ГФО	Эффективность местоопределения и ее приращение (в скобках) при ГФО
СРНС УКВ диапазона	<u>Полуэмпирические модели</u> (Хопфилда, Саастамойнена, др.) <u>Данные наблюдений</u> (МН, РВП)	<u>Эмпирические модели</u> (модель Клобучара, NeQuick и др.) <u>Карты ПЭС</u> (GIM, US-TEC и др.) Данные наблюдений (РП СРНС)	Уменьшение погрешности на 70%	0,07–1,00 (0,05–0,32)
РЛС УКВ диапазона	<u>Полуэмпирические модели радиоатмосферы</u> (модель эффективного радиуса Земли, экспоненциальная модель и др.) <u>Данные наблюдений</u> (МН)	<u>Эмпирические модели</u> (SIMP, IRI и др.) <u>Данные наблюдений</u> (РП СРНС)	Уменьшение погрешности на 60–90%	1,00 (0,00–0,47)
РЛС КВ диапазона	Нет	<u>Теоретические статические модели</u> (RTIM и др.). <u>Эмпирические модели</u> (SIMP, IRI, GPSII и др.). <u>Теоретические динамические модели</u> (PRISM и др.). <u>Данные наблюдений</u> (ВЗ, НЗ, ВНЗ, РП СРНС, КИ, УФ-С)	Уменьшение погрешности на 65%	0,17–1,00 (0,00–0,37)

Оценки эффективности местоопределения с помощью РТС после учета влияния среды распространения радиоволн в процессе ГФО показывают, что эффективность применения РЛС дециметрового и метрового диапазонов длин волн в текущих геофизических условиях приблизилась к единице, что свидетельствует о достижении цели применения РЛС в большинстве случаев. Эффективность применения СРНС УКВ диапазона и РЛС КВ диапазона увеличилась, но цель применения в большинстве случаев не достигается, особенно при жестких требованиях к точности СРНС и РЛС КВ диапазона с допустимыми среднеквадратическими ошибками 0,1 м и 5 км соответственно. Так, даже при смягченных требованиях к максимально допустимой среднеквадратической ошибке определения псевдодальности для СРНС в 0,5 м эффективность местоопределения составит 0,90, а при увеличении допустимой ошибки РЛС КВ диапазона от 5 до 15 км эффективность увеличится лишь до 0,48.

Очевидно, что приведенные оценки получены в условиях очень грубых допущений и являются приблизительными, но вместе с тем позволяют провести сопоставительный анализ и дать качественную характеристику существующей системе учета влияния геофизических условий на применение РТС.

Сопоставляя с требованиями к РТС оценки влияния на них среды с учетом и без учета его компенсации в ходе ГФО для рассмотренных в литературе частных случаев, можно, по крайней мере для этих частных случаев, заключить, что влияние среды является критичным, а проблема учета этого влияния при ГФО стоит наиболее остро для СРНС и РЛС КВ диапазона.

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Принимая во внимание, что в настоящее время основой системы ГФО РТС являются модели среды и средства наблюдения за средой, из возможных недостатков системы учета, приводящих к указанной выше проблеме, можно выделить:

- недостатки моделей среды;
- недостатки средств и систем наблюдения за средой;
- недостатки системного характера, связанные с нерациональным использованием моделей и средств наблюдения в единой системе.

Под моделью среды будем понимать совокупность представлений о морфологии и эволюции геофизических факторов, выраженную с использованием некоторого формального языка [24].

Поскольку наибольшее влияние среди геофизических факторов на эффективность функционирования СРНС и РЛС КВ диапазона оказывают ионосферные, то недостатки в учете именно этих факторов становятся наиболее существенными, а причины их возникновения представляют наибольший интерес.

Недостатки моделей связаны с несоответствием их свойств заданным требованиям. Одним из наиболее важных свойств является адекватность моделируемому объекту. Величина погрешностей в результатах функционирования РТС связана именно с этим свойством.

Модель, как система, представляется совокупностью параметров X или функционалов от этих параметров, связанных некоторым соотношением (оператором) S , определяющим ее структуру [24]. Тогда в неявном виде модель можно представить как

$$S(X) = 0, \quad (2)$$

где $X = X(\vec{r}, t)$ – векторная функция координат \vec{r} и времени t .

Структура модели, количество и тип ее параметров отличают одну модель от другой. Адекватность модели зависит от выбранной структуры S , а именно от полноты учтенной в структуре модели информации о тех или иных процессах, явлениях или областях в атмосфере. Данную информацию получают теоретическим или эмпирическим путем. Степень учета

зависит в первую очередь от уровня теоретических знаний о протекающих в атмосфере процессах и явлениях или количества имеющихся данных наблюдений, на основе которых построена модель. В областях атмосферы, не охваченных архивными данными наблюдений требуемого объема и качества, построение структуры S модели возможно лишь с использованием теоретических описаний процессов и явлений.

Параметры X включают в себя внешние (входные) параметры X_1 и собственно параметры X_2 состояния среды (выходные): $X = \langle X_1, X_2 \rangle$. В явном виде модель представляется как отображение F_S элементов X_1 пространства внешних параметров модели в элементы X_2 пространства параметров состояния среды:

$$X_2 = F_S(X_1). \quad (3)$$

Отображение F_S представляет собой аппроксимацию взаимосвязи входных и выходных параметров модели, полученную исходя из каких-либо соображений. Аппроксимация может иметь сложный вид и может быть построена на основе комплекса моделей.

Эмпирические модели атмосферы строятся с использованием физико-статистического подхода [24], предполагающего стохастическую природу взаимосвязи параметров. Примерами таких моделей, используемых или рассматриваемых для принятия решения об использовании в оперативной практике ГФО РТС в различных системах мониторинга ионосферы, являются [12, 28, 30, 31, 36, 41, 45, 48, 51, 50, 52]:

- *Real-Time Ionospheric Model* (RTIM);
- *International Reference Ionosphere* (IRI);
- *IRI-Real-Time Assimilative Mapping* (IRTAM);
- *System of Ionosphere Monitoring and Prediction* (SIMP-1);
- *Electron Density Assimilative Model* (EDAM);
- *GPS-TEC based Ionospheric Inversion* (GPSII);
- *Taiwan Ionospheric Model* (TWIM);
- *Artificial Neural Network-Based Ionospheric Model* (ANNIM);
- модель Клубучара или *Ionospheric Correction Algorithm* (ICA);
- *NeQuick*.

Элементы структуры указанных моделей – это полученные эмпирически аппроксиманты, имеющие вид квазипарабол, мультиквадриков, слоев Эпштейна, их комбинаций, а также других функций, связывающих внешние параметры в виде индексов солнечной и геомагнитной активности, различных коэффициентов, координат и времени с параметрами состояния в виде значений концентрации электронов и других параметров состояния ионосферы.

Наиболее совершенные эмпирические модели имеют низкую адекватность над океанскими районами, в низких и высоких широтах, а также в Южном полушарии ввиду низкой плотности существующей последние десятилетия наблюдательной сети. Эти недостатки восполняются в настоящее время применением космических средств наблюдения, расширением состава наблюдаемых параметров. В работе [24] показано, что для получения в каком-то смысле «надежных» оценок параметров эмпирической модели по архивным данным наблюдений необходимо иметь выборку объемом, в несколько десятков раз превышающим количество оцениваемых параметров. Используя рассуждения [24], можно заключить, что для построения эмпирической полусферной модели в диапазоне высот от 60 до 1000 км с аппроксимантом в виде сеточной функции в узлах сетки с шагом 2 км по высоте, 5° по широте и 10° по долготе для каждого часа, дня в году и 10 уровней солнечной активности необходим объем выборки данных порядка $2 \cdot 10^{12}$ значений. Возможности получения такой выборки в настоящее время ограничены по причине непродолжительности рядов наблюдений. В этой связи существующие эмпирические модели являются достаточно грубыми: они не позволяют описывать пространственные неоднородности среднего и мелкого масштабов. Для исключения этого недостатка используют их коррекцию по данным текущих наблюдений.

Из приведенных моделей только модель Клобучара не предполагает ассимиляции фактических данных, при этом ее точность составляет порядка 50%. Основным ее преимуществом является простота.

Теоретические модели строятся с использованием гидродинамического или динамико-стохастического подходов [24] и основаны на соотношениях динамики ионосферной плазмы, включающих уравнения сохранения массы, импульса, энергии. Эти соотношения описывают изменения параметров состояния во времени (эволюцию), устанавливая таким образом временные взаимосвязи между параметрами. Для таких моделей необходимо задание начальных значений параметров. Эти значения получают на основе ассимилируемых данных наблюдений или с использованием эмпирических моделей. Примерами теоретических моделей являются [23, 34, 44, 49]:

– *Parameterized Real-time Ionospheric Specification Model (PRISM)*;

– ассимиляционная модель ионосферы Центральной аэрологической обсерватории (АМИ);

– *Utah State University Global Assimilative Ionospheric Model (USU-GAIM)*;

– *Jet Propulsion Laboratory Global Assimilative Ionospheric Model (JPL-GAIM)*.

Элементами структуры указанных моделей являются аппроксиманты в виде численных схем дифференциальных уравнений и эмпирических параметризаций, связывающих внешние параметры в виде индексов солнечной и геомагнитной активности, а также наблюдаемых в конкретных областях значений параметров состояния ионосферы с параметрами ее состояния в интересующих пространственно-временных областях.

Теоретические модели являются более сложными с вычислительной точки зрения, чем эмпирические и требуют задания большого количества исходных параметров. Количество этих параметров стремятся уменьшить за счет обеспечения самосогласованности моделей путем замыкания системы уравнений и задания различного рода параметризаций на основе эмпирических зависимостей. Поэтому большинство современных теоретических моделей, строго говоря, являются моделями смешанного типа – полуэмпирическими. Недостаточная адекватность эмпирических моделей связана с недостатком теоретических знаний о природе моделируемых процессов и явлений, с особенностями численной реализации моделей и задаваемых параметризаций.

Очевидно, что в полной мере информацию о процессах и явлениях в атмосфере учесть невозможно, но если параметры X считать случайными с известным законом распределения, то можно оценить степень неопределенности результатов моделирования состояния атмосферы. Поскольку стохастическая природа каналов распространения радиосигнала обусловлена во многом случайно-неоднородной средой распространения радиоволн, стохастические модели среды позволяют оценить степень неопределенности параметров этих каналов и, соответственно, принимаемых радиосигналов. Таким образом, стохастические модели среды содержат дополнительную информацию, необходимую для получения априорных оценок эффективности ГФО РТС в тех или иных условиях их применения. В настоящее время все используемые в практике модели, как эмпирические, так и теоретические, являются детерминированными и не позволяют априори оценить степень неопределенности результатов моделирования.

Итак, естественными направлениями развития моделей среды являются:

– увеличение количества и качества архивных и текущих данных наблюдений атмосферы над интересующими районами, используемых при построении модели и ее адаптации к текущим геофизическим условиям;

– увеличение количества процессов и явлений, описываемых моделями атмосферы;

– исследование и учет в моделях среды законов распределения случайных вариаций параметров состояния атмосферы.

На сегодняшний день имеется большой архив данных наблюдений за ионосферой, полученных с использованием различных систем наблюдений. Но вместе с тем существуют нео-

хваченные наблюдениями пространственные области и пропуски в рядах наблюдений, либо состав наблюдаемых параметров и точность их оценивания в этих пространственно-временных областях ограничены.

Наблюдение [27] – в науках о Земле, в том числе и в метеорологии, гидрометеорологии, геофизике, астрономии – это целенаправленный процесс регистрации, качественной оценки и измерения явлений природы в естественных условиях их протекания.

Основными методами наблюдения параметров состояния ионосферы являются методы дистанционных измерений [2, 17, 20–22, 39]:

- вертикальное, наклонное и возвратно-наклонное коротковолновое зондирование (ВЗ, НЗ и ВНЗ);
- внешнее, трансionoсферное и обратное трансionoсферное коротковолновое зондирование (ВнЗ, ТИЗ, ОТИЗ);
- системное коротковолновое зондирование с помощью методов ВЗ, НЗ, ВнЗ, ТИЗ, ОТИЗ;
- радиопросвечивание СРНС (РП);
- радиотомография (РТ);
- радиозатменные (РЗ) методы;
- УФ-спектрометрия (УФ-С);
- метод некогерентного рассеяния (НР);
- коротковолновое когерентное зондирование (КЗ);
- метод частичных отражений (ЧО);
- риометрический метод (РМ).

Кроме того, с использованием датчиков заряженных частиц осуществляются контактные измерения на борту низкоорбитальных космических аппаратов. Основные преимущества и недостатки каждого из отдельных методов в основном связаны с недостаточными точностью определения параметров состояния ионосферы, пространственным разрешением и пространственным охватом.

Качественный анализ преимуществ и недостатков приведенных методов наблюдения за ионосферой позволяет сделать вывод, что в целом повышение пространственного охвата компенсируется снижением пространственного разрешения и точности метода.

Приоритетным показателем качества метода наблюдения является его точность, поскольку от точности геофизических данных, используемых в системе ГФО РТС, существенным образом зависит точность определения координат объектов [14]. При этом неточные геофизические данные не смогут повысить эффективность применения РТС.

С точки зрения точности наиболее пригодными для применения в системе обеспечения различных РТС являются ВЗ, ВнЗ, РП и КИ. Именно эти методы нашли наибольшее распространение в системе ГФО РТС различных типов во всем мире. Методы НР, КЗ, ЧО и РМ применяются, как правило, в научных исследованиях ввиду сложности конструкции измерительной системы для их реализации, а сами измерительные системы представлены в небольшом количестве по всему миру и для оперативного ГФО РТС не используются.

Каждый метод измерения, в свою очередь, основан на использовании, в том или ином виде, модели измерения – математической связи между всеми величинами (входными, выходными, влияющими), о которых известно, что они участвуют в измерении [13]. В случае дистанционных измерений эта модель включает модель переноса излучения, а также модель объекта измерения (атмосферы) – математическую модель зависимости между физическими величинами, характеризующими свойства объекта измерений (атмосферы) [16].

В неявном виде модель излучения и модель объекта измерения можно соответственно представить как

$$R(\mathbf{X}'_2, \mathbf{Y}) = 0, \quad (4)$$

$$M(\mathbf{X}'_1, \mathbf{X}'_2) = 0, \quad (5)$$

где R – оператор, определяющий структуру модели переноса излучения;
 Y – параметры излучения, $Y = Y(\vec{r}, t)$;
 M – оператор, определяющий структуру модели объекта измерения (атмосферы);
 X'_1, X'_2 – входные и выходные параметры модели объекта измерения (атмосферы) в виде векторной функции координат \vec{r} и времени t :

$$X'_1 = X'_1(\vec{r}, t),$$

$$X'_2 = X'_2(\vec{r}, t).$$

Тогда в явном виде эти модели можно представить как

$$Y = F_R(X'_2), \quad (6)$$

$$X'_2 = F_M(X'_1), \quad (7)$$

где F_R и F_M – операторы, аппроксимирующие взаимосвязи параметров излучения и параметров модели объекта измерения.

В качестве моделей объектов измерения, на которых основаны методы измерения параметров состояния ионосферы, могут выступать как простые аналитические модели сферически слоистой ионосферы в виде параболического слоя или тонкого слоя на заданной высоте, так и более сложные эмпирические модели, например IRI.

В большинстве случаев методическая погрешность измерения параметров состояния ионосферы больше инструментальной погрешности или сопоставима с ней. В этом случае погрешности наблюдения состояния ионосферы связаны с неадекватностью модели объекта измерения, и для их уменьшения необходимо повышать адекватность модели измерений: например, оптимизировать состав векторов Y измеряемых параметров и X параметров модели или структуру M и R .

Как уже утверждалось, система учета строится в общем случае на основе модели, ассимилирующей фактически данные наблюдений за ионосферой в целях компенсации неадекватности модели. В этом смысле адекватность описания среды в значительной степени определяется качеством системы наблюдения, а также способом ассимиляции результатов наблюдений в модель.

Суть ассимиляции данных заключается в объединении данных наблюдений и данных диагностической модели в единой модели. Для этого используют следующие пути:

– по данным X'_2 наблюдений аппроксимируют среду диагностической моделью с заданной структурой F_S , варьируя некоторыми из ее параметров X ;

– по данным наблюдений X'_2 аппроксимируют среду другим аппроксимантом (моделью) с некоторой структурой A , связывающей данные X'_2 измерений и параметры X_2 диагностической модели.

При этом первый путь можно рассматривать как частный случай второго, когда аппроксимантом A , связывающим параметры X диагностической модели S среды с данными X'_2 измерений, является сама диагностическая модель. Указанный аппроксимант будем называть ассимиляционным аппроксимантом, который в неявном виде может быть представлен как

$$A(X_2, X'_2, X_3) = 0, \quad (8)$$

где A – оператор, определяющий структуру модели аппроксиманта;

X_3 – неизвестные параметры состояния среды, $X_3 = X_3(\vec{r}, t)$.

В явном виде ассимиляционный аппроксимант можно представить как модель, описываемую выражением

$$X_3 = F_A(X_2, X'_2), \quad (9)$$

где F_A – оператор, аппроксимирующий взаимосвязи параметров диагностической модели, параметров модели объекта измерения и неизвестных параметров состояния ионосферы.

Основа технологии усвоения, используемой в алгоритме ассимиляции, – это основа технологии построения ассимиляционного аппроксиманта. Главными подходами к ассимиляции данных в модели, на основе которых строится аппроксимант, являются:

- использование метода регуляризации (4D-Var, 3D-Var);
- использование МНК;
- использование фильтра Калмана;
- использование нейронной сети.

Первые три подхода используются для решения задачи минимизации невязки между моделью и данными наблюдений, при этом можно показать, что при определенных условиях эти подходы будут идентичны друг другу. Последний подход включает, в том числе, построение аппроксиманта в виде множественной регрессии.

Пользуясь ранее введенными обозначениями с позиций теории динамических систем [5], существующую систему ГФО РТС в общем виде можно представить в виде совокупности взаимодействующих систем (рис. 1), каждая из которых представляет собой одну из упомянутых ранее моделей.

В данном представлении известными параметрами являются X'_1, X_1, Y , необходимо определить X_3 . Из схемы видно, что определение состояния ионосферы требует решения обратной задачи. Учитывая, что данные измерений Y содержат погрешности, зачастую эта обратная задача является некорректно поставленной, и возникает необходимость для обеспечения единственности и непрерывной зависимости решения от исходных данных измерений (регуляризации решения). Для этого необходимо использование какой-либо дополнительной информации о решении.

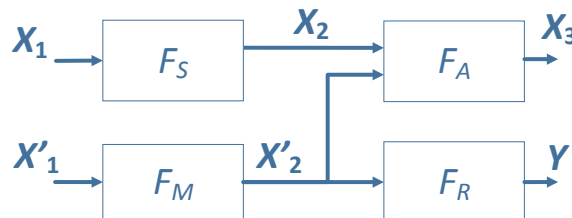


Рис. 1. Модель системы ГФО РТС

Одним из источников такой информации могут быть различные не используемые в традиционных методах и средствах измерений параметры зондирующих сигналов, несущие дополнительную информацию о параметрах состояния ионосферы (частота Доплера, параметры пространственного разделения сигналов и т. п.).

Другим источником, в дополнение к используемым в существующей системе ГФО РТС, могут быть известные закономерности изменения состояния среды и системы наблюдений во времени (динамические процессы в ионосфере, законы движения космических аппаратов, используемых для наблюдения). Если дискретизировать приведенные на схеме системы и представить в виде конечного множества подсистем [6], построить матрицу наблюдаемости и применить критерий Калмана для оценивания полной наблюдаемости, то можно показать, что в случае статичности систем, описываемых с помощью F_A, F_M, F_S, F_R , они будут наблюдаемыми только тогда, когда в наблюдениях участвуют все параметры состояния ионосферы, т. е. $X_3 \sim X'_2$ (векторы наблюдаемых и диагностируемых параметров эквивалентны), что не соответствует возможностям средств наблюдения ввиду ограниченности пространственной области их действия.

Как уже отмечалось, применение каждой из моделей в меру их неадекватности приводит к погрешностям. Таким образом, увеличение количества моделей в структуре при определен-

ных условиях может привести к возрастанию общей погрешности определения X_3 . Например, в настоящее время наблюдается тенденция к усвоению в модели как можно большего количества данных, получаемых различными методами наблюдений. Каждый из методов содержит свою модель измерения, каждая из которых может являться источником как полезной информации, так и погрешностей. В то же время диагностическая модель ионосферы как распределенная система может проявлять большую или меньшую чувствительность к различным данным наблюдений.

Кроме того, множество состояний, описываемых диагностической и ассимиляционной моделями, может быть не согласовано или слабо согласовано с множеством состояний, описываемых моделями объектов измерений. Это приводит к погрешностям в прогнозировании состояния радиоканалов. Например, предположение сферической слоистости среды распространения радиоволн на наклонной трассе при построении вертикальных профилей состояния ионосферы после усвоения в модель, учитывающую горизонтальные градиенты, заведомо приведет к отклонениям моделируемой амплитудно-частотной характеристики радиоканала от наблюдаемой. То есть выбор моделей, а также включение тех или иных данных наблюдений в ассимиляционную модель должны быть обоснованы с точки зрения эффективности ГФО РТС.

Выбор подходов к ассимиляции данных также имеет значение, поскольку каждый подход использует определенные предположения. Например, использование фильтра Калмана предполагает, что случайные ошибки измерения распределены по нормальному закону с нулевым средним. В то же время, согласно универсальной теореме аппроксимации Цыбенко [33], использование нейронной сети с достаточным количеством нейронов скрытого слоя по мере ее обучения способно аппроксимировать любой вид непрерывной зависимости с любой точностью. Различные алгоритмы имеют разную скорость ассимиляции, которая, в свою очередь, во многом зависит от усваиваемых данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обобщая качественный анализ существующей системы ГФО РТС можно выделить следующие ее слабые стороны:

- недостаточный объем выборки данных наблюдений;
- ограниченность области, охваченной точными данными наблюдений;
- низкую регулярность наблюдений;
- недостаточную изученность процессов и явлений, протекающих в ионосфере;
- детерминированность моделей (отсутствие в моделях информации о стохастическом поведении параметров состояния ионосферы);
- статичность моделей (неучет эволюции состояний ионосферы и системы наблюдения);
- несогласованность моделей, данных наблюдений и методов их ассимиляции в системе ГФО РТС с точки зрения эффективности ГФО.

При этом наиболее подверженными влиянию среды РТС являются:

- спутниковые радионавигационные системы;
- радиолокационные станции коротковолнового диапазона.

В литературе [37] ранее уже высказывалась идея о необходимости использования комплексного системного подхода к построению системы диагностирования, которая оптимальным образом сочетала бы (комбинировала) существующие и перспективные технологии получения информации об ионосфере.

С учетом существующих недостатков системы ГФО РТС можно сформулировать следующие основные принципы ее построения.

1. Принцип стохастичности обеспечивает заданный уровень гарантии выполнения или невыполнения задач РТС с требуемым качеством за счет учета меры неопределенности в слу-

чайных неучтенных изменениях состояния среды и их влияния на эффективность применения РТС.

2. Принцип динамичности обеспечивает наблюдаемость ионосферы как системы путем учета изменения во времени как состояния среды, так и подсистемы наблюдений, для этого все модели должны быть динамическими.

3. Принцип комплексности обеспечивает наблюдаемость ионосферы как системы путем сбора и обработки в единой системе всех потенциально доступных данных наблюдений, включая данные с собственных источников в составе РТС, данные с ведомственных (в составе эксплуатирующей организации) и вневедомственных средств наблюдений.

4. Принцип оптимальности обеспечивает предъявление требований к дооснащению РТС минимальным, но достаточным количеством и составом собственных и ведомственных средств с учетом уже имеющихся для достижения требуемого качества решения задач РТС путем выбора оптимальной комбинации моделей, состава наблюдаемых параметров и методов ассимиляции данных наблюдений с точки зрения эффективности ГФО РТС.

Реализация указанных принципов связана с решением ряда научных и практических проблем. Для анализа степени неопределенности необходим большой архив данных наблюдений за ионосферой в интересующей области или в области с аналогичными геофизическими условиями. Для учета динамики в процессе диагностирования ионосферы необходимы модели эволюции системы наблюдений с использованием уравнений движения космических аппаратов. Для обеспечения оптимальности системы следует в первую очередь решить научную проблему синтеза системы ГФО РТС. Для обеспечения комплексности наблюдений обязательно наличие единой развитой системы сбора, обработки, хранения и распространения геофизических данных.

В вопросах реализации указанных принципов наиболее острой практической проблемой является создание единой системы сбора, обработки, хранения и распространения геофизических данных в рамках обеспечения требований комплексности данных, поскольку при наличии в Российской Федерации различных организаций, обладающих средствами и системами мониторинга ионосферы, в настоящее время отсутствует единая стратегия развития этих систем именно в интересах ГФО РТС. Для эффективного использования существующих на сегодняшний день информационных продуктов в качестве составных частей комплекса необходимых для ГФО РТС данных, следует соблюдать принципы комплексности и оптимальности. С этой точки зрения значимость отдельно предоставляемых в текущее время геофизических данных не вполне понятна, поскольку отсутствует понимание их конкретной роли и места в системе ГФО РТС, а также их вклада в повышение эффективности ГФО РТС. Определение и обоснование облика системы ГФО РТС с точки зрения максимизации эффективности ее функционирования и объединение усилий по целенаправленному развитию систем мониторинга ионосферы, где у каждой из существующих систем будет своя область ответственности, позволят непременно достичь желаемой цели, в первую очередь за счет максимально эффективного их применения.

Список используемых источников

1. *Акимов В. Ф., Калинин Ю. К.* Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С. Ф. Боева. – М.: Техносфера, 2017. – 492 с.
2. Исследование высокоширотной ионосферы по данным УФ-спектрометрии, глобальным ионосферным картам GIM и высокоорбитальной радиотомографии / Е. С. Андреева [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 103–111.
3. Радиолокационные системы: учеб. пособие / В. В. Ахияров [и др.]; под ред. А. И. Николаева. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 349 с.

4. *Бин Б. Р., Даттон Е. Дж.* Радиометеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 362 с.
5. Математическая теория систем: учебник / В. Н. Калинин [и др.]. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 202 с.
6. *Корыстин А. А., Кулешов Ю. В.* Подход к анализу наблюдаемости ионосферы над труднодоступными территориями для космических систем и комплексов мониторинга // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 217–222.
7. Учет влияния атмосферы на работу РЛС путем использования оперативной геофизической информации / А. А. Корыстин [и др.] // Радиопромышленность. – 2014. – № 1. – С. 89–112.
8. *Красюк Н. П., Коблов В. Л., Красюк В. Н.* Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
9. *Крауз П. В.* Модельные оценки погрешностей определения длины скачка // Материалы IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». 29 нояб.–3 дек. 2010 г. / ИРЭ РАН. – М.: ИРЭ РАН, 2010. – С. 739–743.
10. *Курикса А. А., Липкин А. Л.* Исследование эффективности использования модели IRI для внесения поправок в радиолокационные измерения координат спутников // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – № 5, т. 18. – С. 21–26.
11. Испытания РЛС (оценка характеристик) / А. И. Леонов [и др.]; под ред. А. И. Леонова. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.
12. *Лецинская Т. Ю., Михайлов В. В.* Модель SIMP-1: картирование месячных медиан foF2 по Северному полушарию // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2016. – Т. 56, № 6. – С. 772–780.
13. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д. И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. – Изд. 2-е, испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 82 с.
14. Проблематика коррекции прогностических моделей ионосферы методами радиомониторинга трасс загоризонтной радиолокации / Н. Д. Некипелов [и др.] // Нелинейный мир. – 2006. – № 10, т. 4. – С. 554–560.
15. *Оводенко В. Б., Соколов К. С., Тармаев Н. Г.* Экспериментальные данные по эффективности компенсации влияния среды распространения радиоволн для РЛС УКВ диапазона // XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн»: тр. конф. – Томск, 2016. – Т 1. – С. 151–157.
16. Р 50.2.004-2000. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач: рекомендации по метрологии [приняты и введены в действие Постановлением Госстандарта России от 17.07.2000 г. № 191-ст.]. – М.: Госстандарт России, 2000. – 15 с.
17. *Панасенко С. В., Черногор Л. Ф.* Уравнение дистанционного радиозондирования в методе частичных отражений // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 4. – С. 385–398.
18. *Першин Д. Ю.* Сравнительный анализ моделей тропосферной задержки в задаче определения местоположения высокой точности в спутниковых навигационных системах ГЛОНАСС/GPS // Вестник НГУБ. Сер.: Информационные технологии. – 2009. – Т. 7, вып. 1. – С. 84–91.
19. *Петухов Г. Б.* Теоретические основы и методы исследования эффективности целенаправленных процессов. – МО СССР, 1979. – 176 с.
20. РД 52.26.817 -2015. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям: руководящий документ [утв. Руководителем Росгидромета 13.07.2015]. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2015. – Ч. 1 : Ионосферные наблюдения. – 200 с.

21. Руководство по приборам и методам наблюдений: ВМО – № 8. – Женева: ВМО, 2018. – Т. IV: Космические наблюдения. – 265 с.
22. Системный мониторинг ионосферы: сб. науч. тр. / под ред. доктора физ.-мат. наук Н. Г. Котонаевой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 416 с.
23. Соломенцев Д. В., Хаттатов Б. В., Тутов А. А. Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы для Европейского региона // Геомагнетизм и аэрномия. – 2012. – Т. 52, № 6. – С. 1–13.
24. Суворов С. С. Теоретические основы синтеза специализированных методов прогнозирования и диагностики геофизических условий в средней атмосфере: дис. ... доктора физико-математических наук. – СПб., 1997. – 359 с.
25. Радионавигационный план Российской Федерации [утв. приказом Минпромторга России от 04 сентября 2019 г. № 3296]. – М., 2019. – 122 с.
26. Фабрицио Дж. А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. – М.: Техносфера, 2018. – 936 с.
27. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
28. Angling M. J., Cannon P. S. Assimilation of radio occultation measurements into background ionospheric models // Radio Science. – 2004. – Vol. 39. – RS1S08.
29. Differential validation of the US-TEC model / E. A. Araujo-Pradere [et al.] // Radio Science. – 2007. – Vol. 42. – RS3016.
30. Barnes R. I., Gardiner-Garden R. S., Harris T. J. Real time ionospheric models for the Australian Defence Force // Proc. WARS-2000. – 2000. – P. 122–135.
31. Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Advances in Space Research. – 2008. – № 42. – P. 599–609.
32. The Digital Ionospheric Sounding System network of the US Air Force Weather Service / J. Buchau [et al.] // Report UAG-104. – WDC-A for Solar-Terr. Phys. – 1995. – P. 16–20.
33. Cybenko G. V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function // Mathematics of Control Signals and Systems. – 1989. – Vol. 2, № 4. – P. 303–314.
34. Daniell R. Parameterized Real-Time Ionospheric Specification Model PRISM version 1.0: final report 15 Nov 1988-15 Nov 1991. – Massachusetts: Phillips Laboratory; Hanscom AFB, 1991. – 54 p.
35. Testing Bottom-Side Ionospheric Profiles Generated Using Assimilative Models / S. V. Fridman [et al.] // Beacon Satellite Symposium. – Bath : Poynting Research Institute; University of Birmingham (UK). – 2013.
36. Assimilative model for ionospheric dynamics employing delay, Doppler, and direction of arrival measurements from multiple HF channel / S. V. Fridman [et al.] // Radio Sci. – 2015. – Vol. 51. – P. 176–183.
37. Goodman J. M. Space Weather & Telecommunications. – NY: Springer, 2005 – 382 p.
38. Hoffman-Welenhoff B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and more. – Wien : Springer-Verlag, 2008. – 516 p.
39. Hunsucker R. D. Radio techniques for probing the terrestrial ionosphere. – Berlin : Springer-Verlag, 1991. – 293 p.
40. Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data : Ionospheric perspective / G. Jee [et al.] // Journal Of Geophysical Research. – 2010. – Vol. 115. – A10319.
41. Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. – 1987. – Vol. AES-23, № 3. – P. 325–331.
42. Ionospheric total electron content modelling and the estimation of errors in coordinate measuring caused by solar activity in remote sensing / V. Krasnov [et al.] // International Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 35, № 15. – P. 5913–5925.

43. Comparison between the NeQuick Model and VTEC Estimation by GPS Measurements over Egypt / A. M. Mahrous [et al.] // Mitigation of Ionospheric Threats to GNSS: an Appraisal of the Scientific and Technological Outputs of the TRANSMIT Project. – 2014. – P. 179–190.
44. Development of the Global Assimilative Ionospheric Model / X. Pi [et al.] // Radio Science. – 2004. – Vol. 39. – RS1S06.
45. Nava B., Coisson P., Radicella S. M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2008. – № 70(2008). – P. 1856–1862.
46. Pointed water vapor radiometer corrections for accurate Global Positioning System surveying / R. Ware [et al.] // Geophysical Research Letters. – 1993. – Vol. 20, № 23. – P. 2635–2638.
47. Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar / B.W. Reinisch [et al.] // Radio Science. – 1997. – Vol. 32, № 4. – P. 1681–1694.
48. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI / B. W. Reinisch [et al.] // Radio Science. – 2012. – Vol. 47. – RS0L07.
49. Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) / R. W. Schunk [et al.] // Radio Science. – 2004. – Vol. 39. – RS1S02.
50. Setti Júnior P. T., Alves D. B. M., Silva C. M. Klobuchar and NeQuick G Ionospheric Models Comparison for Multi-GNSS Single-Frequency Code Point Positioning in The Brazilian Region // Bulletin of Geodetic Sciences. – 2019. – Vol. 25(3): e2019016. – 16 p.
51. A near real-time phenomenological model of ionospheric electron density based on GPS radio occultation data / L.-C. Tsai [et al.] // Radio Science. – 2009. – Vol. 44. – RS5002.
52. The Improved Two-Dimensional Artificial Neural Network-Based Ionospheric Model (ANNIM) / S. Tulasi Ram [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2018. – Vol. 123. – P. 1–14.

А. В. Костромитинов,
кандидат технических наук;

И. А. Яременко,
кандидат технических наук

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТУМАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статье описан метод прогнозирования тумана на основе модели сверточных нейронных сетей. Описанный метод позволяет прогнозировать возникновение и рассеяние тумана с заблаговременностью от 3 до 12 ч. Для прогнозирования используются данные метеорологических и аэрологических наблюдений за предшествующие 12 ч, что позволяет учитывать развитие мезомасштабных процессов в атмосфере.

Ключевые слова: нейронные сети, машинное обучение, метеорологическая информация, сверточные нейронные сети, прогноз туманов.

ВВЕДЕНИЕ

В метеорологии задача прогнозирования метеорологических величин и явлений решалась в рамках физико-статистического, динамико-стохастического и гидродинамического подходов. Развитие направления интеллектуализации определило развитие нового подхода в рамках машинного обучения и применения искусственных нейронных сетей (ИНС). Машинное обучение успешно применяется для прогнозирования цен на акции, объемов продаж, стоимости жилья, посещаемости, рисков и критических ситуаций. В метеорологии активные разработки в этом направлении ведут такие компании и организации как *Google*, *Yandex*, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды.

Применение искусственных нейронных сетей для моделирования нелинейных зависимостей будущих значений временных рядов от его прошлых значений и внешних факторов является востребованным и актуальным направлением исследований [3, 4, 8, 9].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТУМАНА

В данной статье рассматриваются ИНС, построенные на основе понятия формального нейрона [14]. На рис. 1 изображена модель нейрона ИНС. Модель ИНС представляет собой совокупность нейронов, объединенных в слои, а также имеющих вычислители передаточных функций и собственные весовые коэффициенты. Такие параметры ИНС как количество и состав слоев, их взаимное расположение и наличие связей между нейронами, тип функций активации нейронов, число итераций обучения являются гиперпараметрами, а их изменение используется для управления процессом обучения ИНС.

В статье [10] выдвигалось предположение о том, что наиболее подходящий класс нейронных сетей для прогнозирования метеорологических величин и явлений это рекуррентные LSTM сети. Недостатком описанного подхода к обучению ИНС является низкая оправданность наличия опасного явления погоды (ОЯП) в 36%.

Возникла необходимость в дальнейшем совершенствовании модели ИНС и ее гиперпараметров. Предлагается использовать такую особенность сверточных нейронных сетей как выделение наиболее значимых признаков [15]. Идея состоит в том, что матрица входных параметров за предшествующие сроки образует собой некий набор признаков, предопределяющий будущее состояние метеорологических параметров. Для сверхкраткосрочного про-

гнозирования заблаговременность прогноза составляет период до 12 ч, а соответствующие линейные расстояния влияющих воздушных масс составляют от 150 до 600 км. Для наукастинга и прогнозов от 3 до 6 ч наиболее очевидным является использование предшествующих данных за период 12 ч, так как анализ наблюдений, полученных за этот период, позволяет сделать вывод о протекающих мезомасштабных процессах в атмосфере и, ввиду их инерционности, составить суждение о будущем состоянии атмосферы.

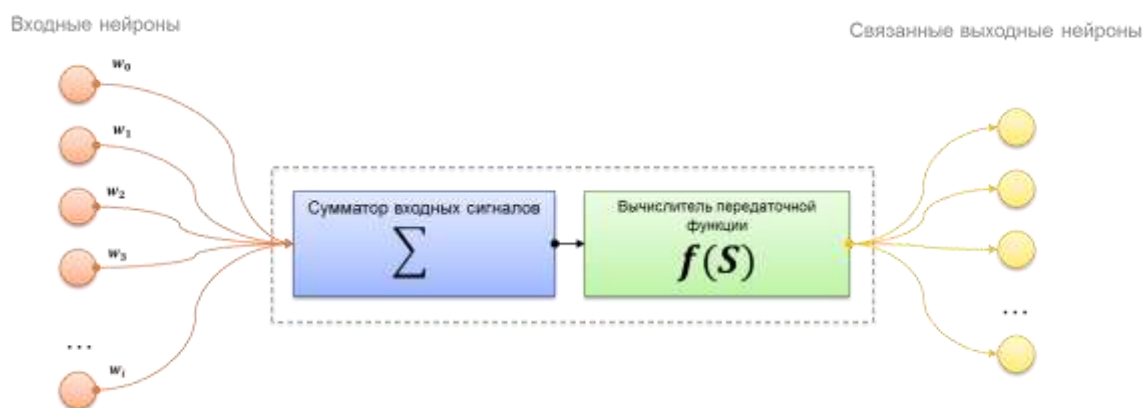


Рис. 1. Модель нейрона искусственной нейронной сети

Сверточные нейронные сети, действующие по принципу человеческого мозга, способны выделять наиболее значимые признаки, и на их основе диагностировать текущее состояние или состояние в будущем. Такой тип нейронных сетей получил широкое распространение в задачах распознавания образов, поиска объектов на изображении, а также прогнозирования перемещения объекта на основе данных видеоряда. Идея использования сверточных нейронных сетей в задачах прогнозирования метеорологических величин и явлений проиллюстрирована на рис. 2.



Рис. 2. Идея формирования блоков входных гидрометеорологических параметров для сверточной нейронной сети

Так, по аналогии с изображениями, где в качестве исходных данных используется матрица пикселей изображения со значениями интенсивности цветных каналов RGB, в предлагаемой сверточной нейронной сети используется карта ретроспективных значений метеорологических параметров. В качестве диагностируемых параметров используются значения времени начала ОЯП, продолжительности ОЯП и признака наличия ОЯП. Структура модели предлагаемой нейронной сети представлена на рис. 3.

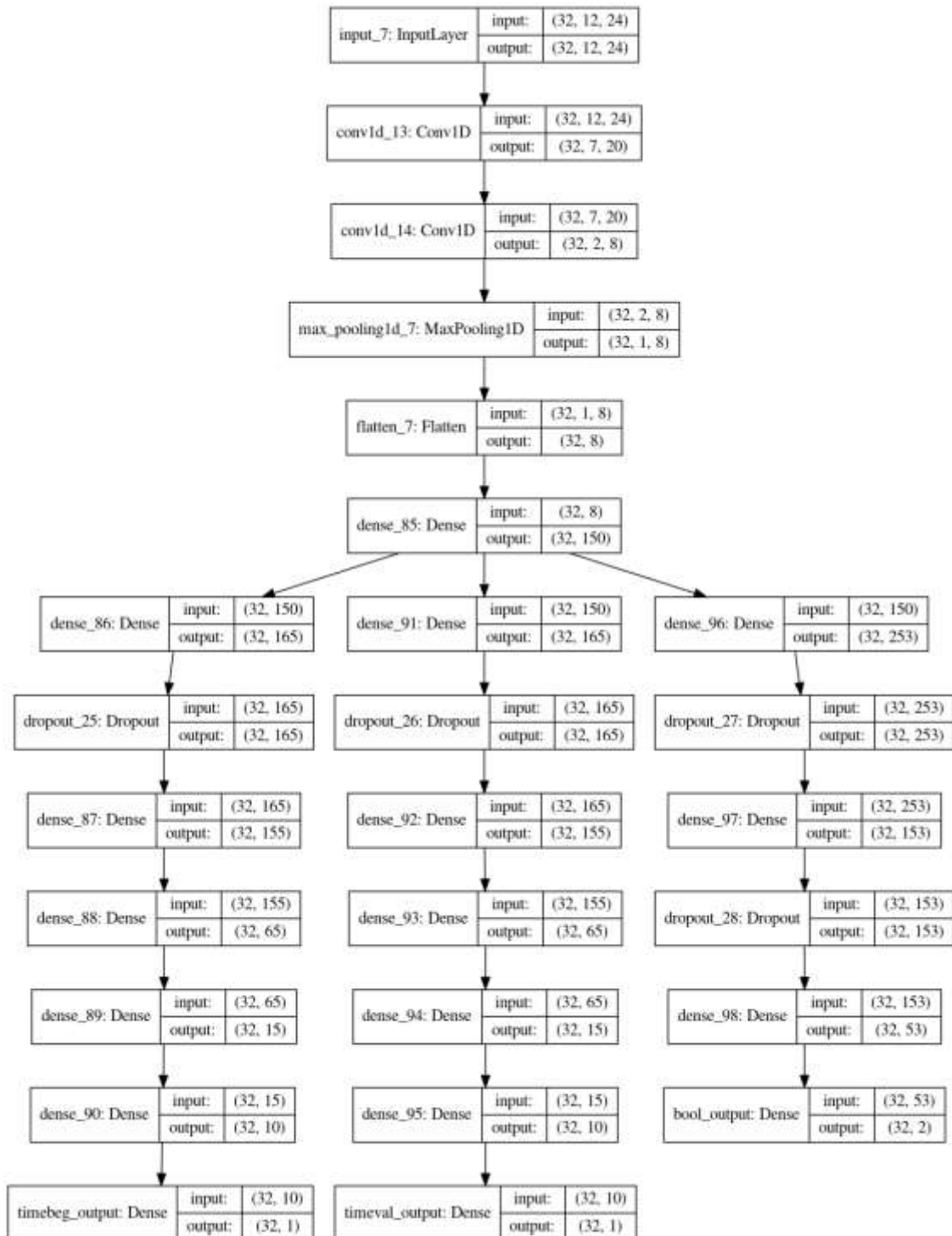


Рис. 3. Структура модели сверточной нейронной сети

В качестве функции активации выбрано сочетание функций:

– сигмоидной (логистической):

$$f(x) = \sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}; \quad (1)$$

– линейного выпрямителя (ReLU):

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ x, & x > 0; \end{cases} \quad (2)$$

– тангенциальной (*th*):

$$f(x) = th(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}; \quad (3)$$

– *softmax*-функции:

$$f_i(\vec{x}) = \sigma(x)_i = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^J e^{x_j}}, \text{ для } i = 1(1)J. \quad (4)$$

В качестве оптимизатора градиентного спуска использовался классический оптимизатор *Adam* (метод адаптивной оценки моментов). Используются следующие функции потерь:

– для выходов ИНС, отвечающих за время начала и продолжительность ОЯП – MSE:

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|\hat{y}^{(i)} - y^{(i)}\|^2, \quad (5)$$

где $y^{(i)}$ – фактически ожидаемый результат;

$\hat{y}^{(i)}$ – прогноз модели;

– для выхода ИНС отвечающего за признак наличия или отсутствия ОЯП в ближайшие 12 ч – *categorical crossentropy* (CE):

$$CE = -(y \log(p) + (1 - y) \log(1 - p)), \quad (6)$$

где p – прогнозируемая вероятность модели;

y – двоичный индикатор (0 или 1).

В результате обучения модели на выборке за 2000–2015 гг. получены следующие показатели: средняя абсолютная ошибка в процентах по результатам прогнозирования продолжительности тумана составила 16 %, а точность прогноза продолжительности тумана составила 84 %.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТУМАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

На основе модели ИНС разработан метод прогнозирования тумана. Структура метода прогнозирования представлена на рис. 4. Особенностью данного метода является то, что для каждого пункта прогнозирования необходимо производить обучение собственной модели ИНС, соответственно необходимо наличие архивных гидрометеорологических данных (ГМД) по пункту.

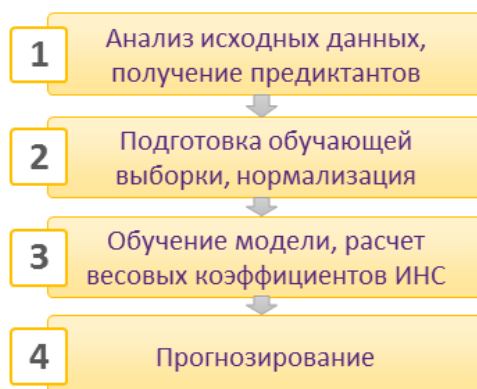


Рис. 4. Структура метода прогнозирования

Оценка качества работы метода производилась путем расчета его оправдываемости для каждого пункта. Для этого составляется таблица сопряженности (табл. 1).

Таблица 1

Таблица сопряженности для вычисления показателей качества метода прогнозирования

Наблюдалось	Прогнозировалось		Σ
	с явлением	без явления	
с явлением	n_{11}	n_{12}	$N_{10} = n_{11} + n_{12}$
без явления	n_{21}	n_{22}	$N_{20} = n_{21} + n_{22}$
Σ	$N_{01} = n_{11} + n_{21}$	$N_{02} = n_{12} + n_{22}$	$N = N_{10} + N_{20} = N_{01} + N_{02}$

В табл. 1 использованы следующие обозначения: n_{11} – число оправдавшихся прогнозов наличия явления; n_{22} – число оправдавшихся прогнозов отсутствия явления; n_{12} – число не оправдавшихся прогнозов отсутствия явления; n_{21} – число не оправдавшихся прогнозов наличия явления; N_{01} – число составленных прогнозов наличия явления; N_{02} – число составленных прогнозов отсутствия явления; N_{10} – число случаев без явления; N_{20} – общее число составленных прогнозов.

На основе расчетов по таблице сопряженности общая оправдываемость предложенного метода прогнозирования тумана составила 94 %.

На рис. 5 представлены графики вычисленной ошибки в прогнозе времени начала и продолжительности тумана по данным аэропортов Уфа, Кольцово, Братск, Таллин. Из графиков видно, что ошибка в прогнозировании времени начала тумана от заданного срока в большинстве случаев не превышает 1 ч, а ошибка определения продолжительности тумана составляет около 1,5–2 ч.

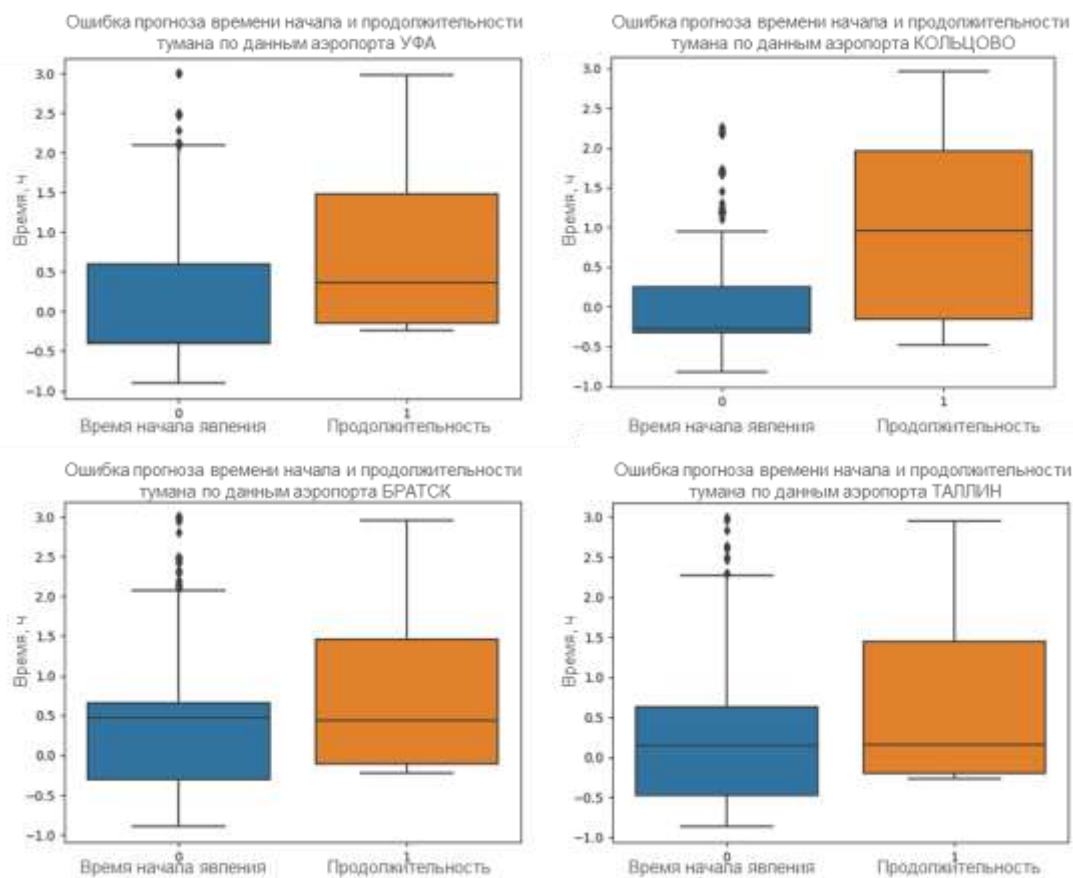


Рис. 5. Графики ошибок прогнозов времени начала и продолжительности тумана по данным аэропортов Уфа, Кольцово, Братск, Таллин

Для оценки качества работы метода прогнозирования были рассчитаны показатели оправдываемости прогнозов наличия и продолжительности тумана в течение предстоящих 12 ч на основе данных, не участвовавших в обучении разработанной модели ИНС с 2016 по 2019 год, представленные на рис. 6.

Название пункта	Общая оправдываемость	Оправдываемость наличия тумана ИНС	Оправдываемость отсутствия по ИНС	Предупрежденность наличия тумана	Предупрежденность отсутствия тумана	Количество сроков наблюдения	Количество наблюдавшихся случаев тумана	Количество случаев отсутствия ояп	Общая оправдываемость методом Зверева	Оправдываемость наличия тумана методом Зверева	Оправдываемость отсутствия тумана методом Зверева	Багров (Н) (>0,33)	Среднее отклонение начала тумана от срока	Среднее отклонение продолжительности
1 Абакан	93,47	87,15	99,78	87,30	99,78	34240	575	33665	58,76	1,66	98,31	99,58	-0,38	0,27
2 Агартала	91,32	83,05	99,58	92,36	98,97	22656	1178	21478	94,66	5,56	94,80	98,63	-1,07	-0,59
3 Астрахань	93,55	87,13	99,97	98,38	99,72	35520	681	34839	74,57	1,82	98,05	99,70	-0,25	1,20
4 Ахваз	97,33	94,95	99,70	73,56	99,96	48448	537	47911	86,30	1,20	98,91	99,67	-0,32	0,30
5 Б.Савино	98,66	97,46	99,86	70,55	99,99	33888	163	33725	69,99	0,50	99,53	99,86	-0,48	2,54
6 Баумкольдер	99,13	99,75	98,51	73,97	99,99	29152	1598	27554	94,52		94,52	98,57	-0,86	2,32
7 Белград	97,53	95,40	99,67	82,84	99,92	35488	676	34812	75,87	1,87	98,08	99,60	-0,41	1,00
8 Братск	98,35	97,58	99,11	34,62	99,99	34496	465	34031	48,21	1,27	98,57	99,11	-0,53	-0,54
9 Гаронс	84,78	69,68	99,89	84,38	99,73	35360	256	35104	76,79	0,79	99,30	99,63	-0,37	1,27
10 Гумрак	97,93	96,11	99,76	93,96	99,85	34560	1340	33220	72,91	3,77	96,09	99,62	-0,35	0,14
11 Говерчинлик	89,20	78,43	99,98	88,89	99,95	20416	45	20371	99,78		99,78	99,93	-0,07	3,31
12 Дамаск	89,15	68,58	95,80	28,77	99,20	26784	1540	25244			94,8808	98,76	2,637	2,90782562
13 Игнатьево	98,11	96,60	99,61	69,57	99,97	28992	368	28624	21,94	1,20	98,48	99,59	-0,31	0,70
14 Иркутск	96,46	93,63	99,30	43,61	99,96	35488	438	35050	49,29	1,26	98,79	99,27	-0,60	0,07
15 Каир	81,54	63,22	99,85	68,32	99,82	34944	161	34783	85,83	0,43	99,54	99,68	-0,21	1,45
16 Каршамба	96,20	92,59	99,81	73,53	99,96	19392	136	19256	99,30		99,30	99,78	-0,10	2,60
17 Кневичи	96,51	93,24	99,78	87,03	99,89	35424	586	34902	28,11	1,65	98,33	99,69	-0,40	-0,82
18 Кольцово	92,60	85,54	99,66	63,77	99,90	35456	334	35122	67,40	1,05	99,11	99,56	-0,60	-0,07
19 Кулдроз	93,44	86,96	99,93	98,75	99,19	37216	1924	35292	80,66	5,31	94,86	99,17	-0,29	-0,19
20 Мохаммед	93,45	86,97	99,93	97,91	99,54	36000	1098	34902	88,09	2,98	96,94	99,49	-0,64	0,21
21 Нижневартовск	85,45	71,04	99,85	80,84	99,75	34432	261	34171	59,69	0,77	99,25	99,61	-0,28	2,41
22 Оренбург	90,89	81,94	99,83	83,81	99,81	34528	352	34176	73,48	1,01	98,98	99,65	-0,48	-0,48
23 Печора	75,71	52,50	98,92	25,00	99,67	5888	84	5804	98,57		98,57	98,64	-0,43	-0,02
24 Ростов-на-Дону	95,94	92,12	99,77	89,45	99,83	17728	379	17349	74,73	2,06	97,84	99,62	-0,48	0,75
25 Рузине	97,82	95,86	99,78	91,30	99,90	40288	988	39300	72,09	2,51	97,57	99,69	-0,25	0,46
26 Рязань	96,80	94,74	98,86	37,50	99,96	2656	48	2608	98,19		98,19	98,91	-0,56	1,08
27 Сабики	98,91	98,08	99,74	65,18	99,99	42528	313	42215	99,26		99,26	99,74	-0,19	1,95
28 Смоленск	97,76	97,26	98,27	76,34	99,84	2688	186	2502	93,08		93,08	98,29	-0,93	0,68
29 Сокол	96,25	93,43	99,08	66,34	99,87	26464	707	25757	21,04	2,67	97,33	98,98	-0,41	0,28
30 Сыктывкар	97,39	95,31	99,46	51,12	99,97	32544	358	32186	67,79	1,15	98,92	99,44	-0,49	-0,04
31 Талаги	86,20	72,81	99,59	65,35	99,71	32576	381	32195	65,46	1,25	98,87	99,32	-0,45	1,49
32 Татры	94,55	89,36	99,74	88,39	99,76	37184	827	36357	71,70	2,23	97,78	99,51	-0,33	1,20
33 Толмачево	94,11	88,24	99,98	97,83	99,90	35424	276	35148	65,14	0,81	99,24	99,89	-0,52	0,28
34 Тусю-ле-Нобль	93,24	86,85	99,63	88,38	99,58	35136	1076	34060	76,86	3,15	96,96	99,24	-0,41	0,23
35 Уфа	89,48	79,07	99,88	92,61	99,61	33184	514	32670	71,37	1,61	98,47	99,51	-0,36	-0,31
36 Центральный	92,96	86,01	99,91	98,30	99,19	31616	1532	30084	72,02	4,67	95,09	99,15	-0,38	-0,20
37 Чертовское	96,46	93,21	99,72	88,96	99,84	33920	833	33087	71,70	2,42	97,53	99,58	-0,58	-0,20
38 Чоджари Чаран Сингх	92,05	84,29	99,81	98,18	98,10	31648	2972	28676	82,11	9,21	90,59	98,12	-0,39	1,27
39 Шахджагал	97,37	94,95	99,80	92,13	99,88	35456	877	34579	42,20	2,28	97,26	99,69	-0,14	-1,04
40 Юташ	97,09	94,26	99,92	93,36	99,93	34336	422	33914	78,04	1,06	98,73	99,85	-0,34	-0,02
41 Якутск	97,17	94,39	99,96	94,51	99,27	5888	546	5342	90,73		90,73	98,86	-0,27	0,07

Рис. 6. Результаты работы метода, рассчитанные по 41 пункту по данным за период с 2016 по 2019 год

Из рис. 6 видно, что наихудшая оправдываемость наличия тумана наблюдается в пунктах, имеющих наименьшую повторяемость случаев наличия тумана. Это связано с тем, что для обучения ИНС необходимо наличие выборки с прецедентами, по которым производится обучение.

Предложенный метод прогнозирования тумана на основе сверточной ИНС позволил обучить ИНС, которая обеспечивает общую оправдываемость прогнозирования начала тумана в течение 12 ч – 94 %, а также точность прогнозирования продолжительности тумана – 84 %. Основная проблема состоит в подготовке необходимых данных для прогноза, так как модель принимает на вход данные в строго определенном порядке и количестве. За счет возможности полностью автоматизировать предложенный метод наблюдается значительный прирост оперативности прогнозирования ОЯП, так как для адаптации существующих методов прогнозирования к конкретным физико-географическим условиям (ФГУ) требуются от 4 до 14

дней, а после автоматизации процесса обучения ИНС с учетом конкретных ФГУ это время сокращается до 2–4 ч.

В сравнении с существующими методами прогнозирования тумана, приведенными в статье [5] и представленными в табл. 2, применение предложенного метода позволит повысить общую оправдываемость прогнозов тумана в среднем на 28 %.

Таблица 2

Оправдываемость методов прогнозирования тумана [5]

Метод	Общая оправдываемость ($U_{об}$)	Оправдываемость наличия ($U_{я}$)	Оправдываемость отсутствия ($U_{б.я}$)	Ложные тревоги
Метод NCAR, США	50 %	12 %	91 %	89 %
Метод NCEP, США	69 %	14 %	92 %	87 %
Метод Венгерской МС, (OMSZ)	72 %	11 %	93 %	90 %
Метод NOAA, США	63 %	14 %	93 %	86 %
Метод Рубинштейна и др., РФ	76 %	13 %	90 %	87 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложены подходы на базе рекуррентных и сверточных нейронных сетей для составления сверхкраткосрочных прогнозов. Установлено, что в задачах наукастинга сверточные нейронные сети имеют преимущество. Исходя из оценки качества работы предложенной модели ИНС по данным 41 аэропорта, данная модель ИНС успешно может быть использована для разработки метода прогнозирования тумана.

Список используемых источников

1. Великанова Л. И. Краткосрочное прогнозирование влажности горных грунтов // Проблемы автоматики и управления. – 2015. – № 4. – С. 158–166.
2. Верзунов С. Н., Лыченко Н. М. Мультивейвлетная полиморфная сеть для прогнозирования геофизических временных рядов // Проблемы автоматики и управления. – 2017. – № 1(32). – С. 78–87.
3. Григорьева Д. Р. Методы статистического прогнозирования // Экономический анализ: теория и практика. – 2015. – № 17. – С. 21–28.
4. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 271 с.
5. Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов / Г. А. Зароченцев [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – № 12. – С. 981–987.
6. Линдигрин А. Н. Искусственные нейронные сети как основа глубинного обучения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – № 12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennye-neuronnye-seti-kak-osnova-glubinno-go-obucheniya> (дата обращения: 07.02.2022).
7. Маккалок У., Питтс У. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности: Автоматы / под ред. К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти. – М., 2003. – 384 с.

8. *Резников Б. А.* Системный анализ и методы системотехники. – М.: МО СССР, 1990. – Ч. 1: Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. – 522 с.
9. Перспективы применения технологий машинного обучения для обработки гидрометеорологической информации / И. А. Готюр [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 152–159.
10. *Яременко И. А.* Метод распределенной обработки метеорологической информации на основе технологий искусственных нейронных сетей // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 263–270.
11. *Hochreiter J.* Untersuchungen zu dynamischen neuronalen Netzen. – URL: <http://people.idsia.ch/~juergen/SeppHochreiter1991ThesisAdvisorSchmidhuber.pdf> (дата обращения: 07.02.2022).
12. Convolutional Neural Networks for Energy Time Series Forecasting / I. Koprinska [et al.] // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – 2018. – P. 1–8.
13. *Lei Yu, Zhao Danning, Cai Hongbing.* Prediction of length-of-day using extreme learning machine // Geodesy and geodynamics. – 2015. – Vol. 6, № 2. – P. 151–159.
14. *Rosenblatt F.* Principles of neurodynamics; perceptrons and the theory of brain mechanisms. In: Palm G., Aertsen A. (eds) Brain Theory. – Springer, Berlin, Heidelberg, 1986. – DOI: 10.1007/978-3-642-70911-1_20.
15. Electroencephalogram-based emotion recognition using a convolutional neural network / V. B. Savinov [et al.] // Bulletin of Russian State Medical University. – 2019. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/electroencephalogram-based-emotion-recognition-using-a-convolutional-neural-network> (дата обращения: 07.02.2022).
16. *Yoshua B.* Learning Long-Term Dependencies with Gradient Descent is Difficult. – URL: <http://ai.dinfo.unifi.it/paolo//ps/tnn-94-gradient.pdf> (дата обращения: 07.02.2022).

Н. В. Лебедев*,

кандидат технических наук;

Н. П. Лесик*;

В. В. Лукин*;

С. А. Назаров*;

В. А. Никольский*,

кандидат технических наук;

В. В. Руденко*,

кандидат физико-математических наук, доцент

*ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» МО РФ, г. Сергиев Посад.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

В статье рассмотрена трехмерная численная модель, адаптированная для решения задач распространения электромагнитного излучения в пространственно-неоднородной плазме.

Ключевые слова: численное моделирование, ионосфера, электромагнитные волны.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день изучение влияния гетерогенной структуры ионосферы на процесс распространения радиоволн является одной из важнейших задач в проблеме классификации ионосферных возмущений и служит основой для развития радиофизических методов наблюдений за процессами, происходящими в ионосфере.

Так, воздействие на ионосферу химических веществ, ионизирующих излучений, акустических волн или мощного радиоизлучения способствует возникновению в ней неоднородностей электронной концентрации, приводящих к изменению высоты отражения радиоволн, по которым можно оценить параметры источника ионосферных возмущений. Кроме того, при движении объектов в верхней атмосфере со скоростями, превышающими скорость звука в три и более раз, образующаяся вокруг объекта ударная волна начинает формировать среду со свойствами ионизованного газа и плазмы. В результате возникают сложности радиообмена в диапазонах частот систем спутниковой навигации, радиолокации и радиосвязи, делающие проблематичным оперативное управление летательными аппаратами на таких скоростях. Обеспечение бесперебойной радиосвязи в данных условиях требует изучения особенностей распространения радиоволн в пространственно-неоднородной ионизованной среде.

В виду отсутствия достаточных объемов экспериментальных данных в области наблюдения за вышеперечисленными процессами основной акцент делается на создание и развитие аппарата численного моделирования, позволяющего задавать сложные модели пространственно-неоднородной плазмы в задачах расчета распространения радиоволн.

В настоящей работе за основу взята конечно-разностная модель [1] решения системы уравнений Максвелла во временной области, позволяющая анализировать электромагнитные явления в диспергирующих средах. Модель адаптирована для решения трехмерных задач распространения электромагнитного излучения в пространственно-неоднородной плазме.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

В представленной модели свойства диспергирующей среды задаются через вектор P ее поляризованности, имеющий связь с вектором J_p плотности тока поляризации.

Так, материальное уравнение для вектора D электрической индукции имеет вид

$$\dot{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \dot{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \dot{E} = \varepsilon_0 \dot{E} + \dot{P}, \quad (1)$$

где χ_e – диэлектрическая восприимчивость среды. Здесь и далее точка над символом величины обозначает спектральную плотность этой величины.

Относительная диэлектрическая проницаемость ионизованного газа [2] в частотной области сводится к выражению

$$\varepsilon = 1 + \frac{-\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu_e)}, \quad (2)$$

где ω_p – плазменная частота, $\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}$, Гц;

N_e – концентрация электронов, м⁻³;

e – заряд электрона, Кл;

m_e – масса электрона, кг;

ν_e – эффективная частота столкновений электронов, с⁻¹.

Из (1) и (2) вектор P поляризованности среды может быть представлен в виде

$$\dot{P} = \frac{-\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu_e)} \varepsilon_0 \dot{E}. \quad (3)$$

Тогда из уравнений Максвелла с учетом (3) можно вывести уравнение для нахождения J_p плотности тока поляризации:

$$\text{rot} \dot{H} = j\omega \dot{D} + \dot{J};$$

$$\text{rot} \dot{H} = j\omega(\varepsilon_0 \dot{E} + \dot{P}) + \dot{J};$$

$$\text{rot} \dot{H} = j\omega \varepsilon_0 \dot{E} + \frac{\omega_p^2 \varepsilon_0}{(j\omega - \nu_e)} \dot{E} + \dot{J}; \quad (4)$$

$$\dot{J}_p = \frac{\omega_p^2 \varepsilon_0}{(j\omega - \nu_e)} \dot{E};$$

$$j\omega \dot{J}_p - \nu_e \dot{J}_p = \omega_p^2 \varepsilon_0 \dot{E}.$$

Для временной области:

$$\frac{\partial J_p}{\partial t} + \nu_e J_p = \omega_p^2 \varepsilon_0 E. \quad (5)$$

В результате получается система уравнений Максвелла, дополненная выражением (5):

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + J_p + J, \\ \omega_p^2 \varepsilon_0 E = \frac{\partial J_p}{\partial t} + v_e J_p, \\ \operatorname{rot} E = -\mu \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}. \end{cases} \quad (6)$$

ФОРМУЛИРОВКА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Система уравнений (6) предполагает условия изотропии среды и может быть решена в декартовой системе координат:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + J_{px} + J_x, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + J_{py} + J_y, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} + J_{pz} + J_z, \\ \omega_p^2 \varepsilon_0 E_x = \frac{\partial J_{px}}{\partial t} + v_e J_{px}, \\ \omega_p^2 \varepsilon_0 E_y = \frac{\partial J_{py}}{\partial t} + v_e J_{py}, \\ \omega_p^2 \varepsilon_0 E_z = \frac{\partial J_{pz}}{\partial t} + v_e J_{pz}, \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}. \end{cases} \quad (7)$$

Для этого применяется метод конечных разностей во временной области с использованием шаблона, представленного на рис. 1.

Пространственная неоднородность плазмы задается величинами N_e и v_e в трехмерном пространстве в необходимых узлах сетки.

Для решения задачи вводится декартова система координат, привязанная к счетному объему кубической формы (части пространства над поверхностью земли), включающему области задания пространственно неоднородной ионосферной плазмы и источников радиоизлучения (рис. 2).

Численное решение выполняется с дискретизацией пространственной области задачи на прямоугольные ячейки с размерами $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, образующие конечно-разностную сетку. Интервалы Δt определяют дискретизацию временной области. Пространственно-временная

точка на сетке устанавливается равной (x_i, y_j, z_k, t_n) . Расположение составляющих векторов электрического и магнитного полей, а также плотности тока поляризации относительно ячейки сетки (размер сетки = $N_x \Delta x \times N_y \Delta y \times N_z \Delta z$) соответствует:

$$E_x^n(i, j, k) = E_x(x_{i+1/2}, y_j, z_k, n\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x, \quad j=1, \dots, N_y+1, \quad k=1, \dots, N_z+1;$$

$$E_y^n(i, j, k) = E_y(x_i, y_{j+1/2}, z_k, n\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x+1, \quad j=1, \dots, N_y, \quad k=1, \dots, N_z+1;$$

$$E_z^n(i, j, k) = E_z(x_i, y_j, z_{k+1/2}, n\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x+1, \quad j=1, \dots, N_y+1, \quad k=1, \dots, N_z;$$

$$J_{px}^n(i, j, k) = J_{px}(x_{i+1/2}, y_j, z_k, n\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x, \quad j=1, \dots, N_y+1, \quad k=1, \dots, N_z+1;$$

$$J_{py}^n(i, j, k) = J_{py}(x_i, y_{j+1/2}, z_k, n\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x+1, \quad j=1, \dots, N_y, \quad k=1, \dots, N_z+1;$$

$$J_{pz}^n(i, j, k) = J_{pz}(x_i, y_j, z_{k+1/2}, n\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x+1, \quad j=1, \dots, N_y+1, \quad k=1, \dots, N_z;$$

$$H_x^n(i, j, k) = H_x(x_i, y_{j+1/2}, z_{k+1/2}, (n+1/2)\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x+1, \quad j=1, \dots, N_y, \quad k=1, \dots, N_z;$$

$$H_y^n(i, j, k) = H_y(x_{i+1/2}, y_j, z_{k+1/2}, (n+1/2)\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x, \quad j=1, \dots, N_y+1, \quad k=1, \dots, N_z;$$

$$H_z^n(i, j, k) = H_z(x_{i+1/2}, y_{j+1/2}, z_k, (n+1/2)\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x, \quad j=1, \dots, N_y, \quad k=1, \dots, N_z+1.$$

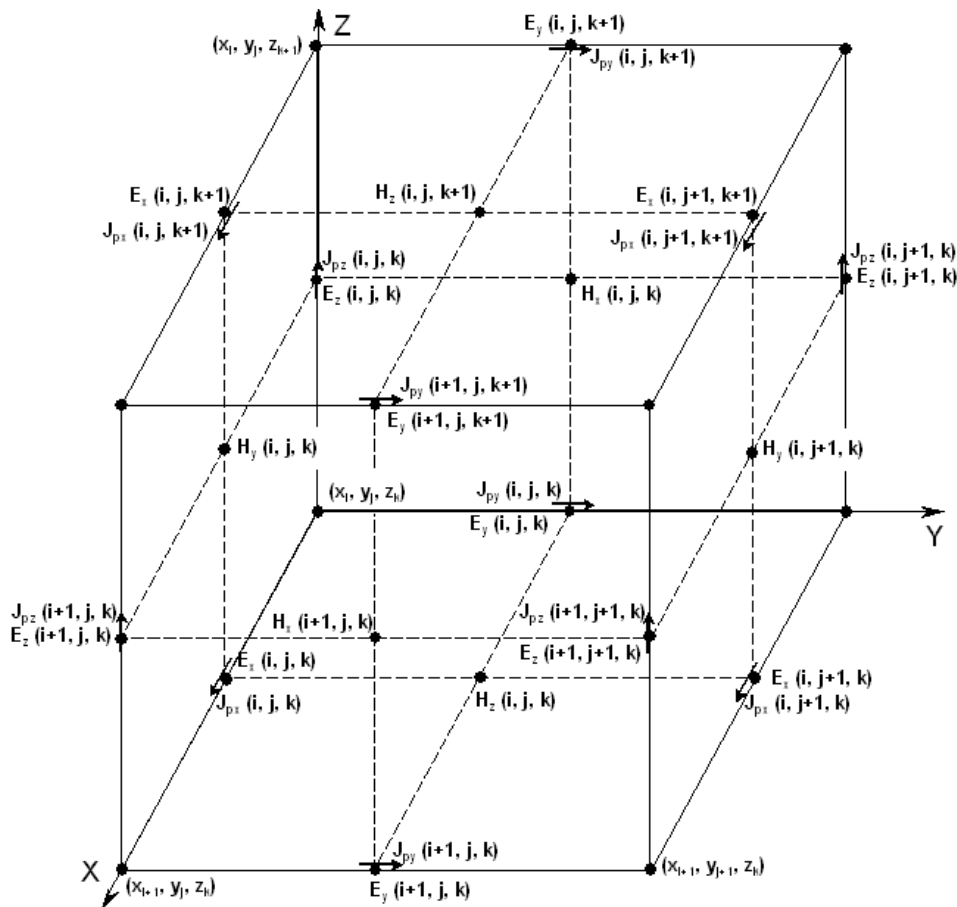


Рис. 1. Конечно-разностный шаблон (ячейка) для нахождения составляющих векторов J_p , E и H



Рис. 2. Пример задания счетного объема в декартовой системе координат

При наличии сторонних токов величины J их плотности задаются составляющими J_x, J_y, J_z в местах расположения E_x, E_y, E_z , но на временных слоях, соответствующих H :

$$J_x^n(i, j, k) = J_x(x_{i+1/2}, y_j, z_k, (n+1/2)\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x, \quad j=1, \dots, N_y+1, \quad k=1, \dots, N_z+1;$$

$$J_y^n(i, j, k) = J_y(x_i, y_{j+1/2}, z_k, (n+1/2)\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x+1, \quad j=1, \dots, N_y, \quad k=1, \dots, N_z+1;$$

$$J_z^n(i, j, k) = J_z(x_i, y_j, z_{k+1/2}, (n+1/2)\Delta t) \quad i=1, \dots, N_x+1, \quad j=1, \dots, N_y+1, \quad k=1, \dots, N_z.$$

В результате конечно-разностный алгоритм сводится к следующим соотношениям (допускается неравномерная сетка):

$$E_x^{n+1}(i, j, k) = \left(\frac{2\varepsilon_0 - \beta\Delta t}{2\varepsilon_0 + \beta\Delta t} \right) E_x^n(i, j, k) - \left(\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_0 + \beta\Delta t} \right) \left(\left\{ \frac{H_y^n(i, j, k) - H_y^n(i, j, k-1)}{z_{k+1/2} - z_{k-1/2}} \right\} - \left\{ \frac{H_z^n(i, j, k) - H_z^n(i, j-1, k)}{y_{j+1/2} - y_{j-1/2}} \right\} + (1+\alpha)J_{px}^n(i, j, k) + J_x^n(i, j, k) \right);$$

$$E_y^{n+1}(i, j, k) = \left(\frac{2\varepsilon_0 - \beta\Delta t}{2\varepsilon_0 + \beta\Delta t} \right) E_y^n(i, j, k) - \left(\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_0 + \beta\Delta t} \right) \left(\left\{ \frac{H_z^n(i, j, k) - H_z^n(i-1, j, k)}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}} \right\} - \left\{ \frac{H_x^n(i, j, k) - H_x^n(i, j, k-1)}{z_{k+1/2} - z_{k-1/2}} \right\} + (1+\alpha)J_{py}^n(i, j, k) + J_y^n(i, j, k) \right);$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k) = \left(\frac{2\varepsilon_0 - \beta\Delta t}{2\varepsilon_0 + \beta\Delta t} \right) E_z^n(i, j, k) - \left(\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_0 + \beta\Delta t} \right) \left(\left\{ \frac{H_x^n(i, j, k) - H_x^n(i, j-1, k)}{y_{j+1/2} - y_{j-1/2}} \right\} - \left\{ \frac{H_y^n(i, j, k) - H_y^n(i-1, j, k)}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}} \right\} + (1+\alpha)J_{pz}^n(i, j, k) + J_z^n(i, j, k) \right);$$

$$J_{xp}^{n+1}(i, j, k) = \alpha J_{xp}^n(i, j, k) + \beta(E_x^{n+1}(i, j, k) + E_x^n(i, j, k));$$

$$J_{yp}^{n+1}(i, j, k) = \alpha J_{yp}^n(i, j, k) + \beta(E_y^{n+1}(i, j, k) + E_y^n(i, j, k));$$

$$J_{zp}^{n+1}(i, j, k) = \alpha J_{zp}^n(i, j, k) + \beta(E_z^{n+1}(i, j, k) + E_z^n(i, j, k));$$

$$H_x^{n+1}(i, j, k) = H_x^n(i, j, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left(\left\{ \frac{E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)}{y_{j+1} - y_j} \right\} - \left\{ \frac{E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)}{z_{k+1} - z_k} \right\} \right);$$

$$H_y^{n+1}(i, j, k) = H_y^n(i, j, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left(\left\{ \frac{E_x^n(i, j, k+1) - E_x^n(i, j, k)}{z_{k+1} - z_k} \right\} - \left\{ \frac{E_z^n(i+1, j, k) - E_z^n(i, j, k)}{x_{i+1} - x_i} \right\} \right);$$

$$H_z^{n+1}(i, j, k) = H_z^n(i, j, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left(\left\{ \frac{E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)}{x_{i+1} - x_i} \right\} - \left\{ \frac{E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)}{y_{j+1} - y_j} \right\} \right);$$

$$\text{где } \alpha = \left(\frac{2 - v_e \Delta t}{2 + v_e \Delta t} \right), \quad \beta = \left(\frac{\varepsilon_0 \omega_p^2 \Delta t}{2 + v_e \Delta t} \right).$$

Для гарантии устойчивости алгоритма пошагового решения разбишка сетки Δx , Δy и Δz должна быть выбрана так, чтобы выполнялось условие Куранта [3]:

$$(\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2} + \Delta z^{-2})^{-1/2} / \Delta t \geq C,$$

где C – скорость света в моделируемой среде.

Для ограничения размеров счетного объема можно ввести вспомогательное граничное условие Мура I порядка, позволяющее досчитывать неизвестные граничные компоненты полей:

$$E_y^{n+1}(1, j, k) = E_y^n(2, j, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta x}{c \cdot \Delta t + \Delta x} \right] \cdot [E_y^{n+1}(2, j, k) - E_y^n(1, j, k)],$$

$$E_y^{n+1}(N_x + 1, j, k) = E_y^n(N_x, j, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta x}{c \cdot \Delta t + \Delta x} \right] \cdot [E_y^{n+1}(N_x, j, k) - E_y^n(N_x + 1, j, k)],$$

$$E_z^{n+1}(1, j, k) = E_z^n(2, j, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta x}{c \cdot \Delta t + \Delta x} \right] \cdot [E_z^{n+1}(2, j, k) - E_z^n(1, j, k)],$$

$$E_z^{n+1}(N_x + 1, j, k) = E_z^n(N_x, j, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta x}{c \cdot \Delta t + \Delta x} \right] \cdot [E_z^{n+1}(N_x, j, k) - E_z^n(N_x + 1, j, k)],$$

$$E_x^{n+1}(i, 1, k) = E_x^n(i, 2, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta y}{c \cdot \Delta t + \Delta y} \right] \cdot [E_x^{n+1}(i, 2, k) - E_x^n(i, 1, k)],$$

$$E_x^{n+1}(i, N_y + 1, k) = E_x^n(i, N_y, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta y}{c \cdot \Delta t + \Delta y} \right] \cdot [E_x^{n+1}(i, N_y, k) - E_x^n(i, N_y + 1, k)],$$

$$E_z^{n+1}(i, 1, k) = E_z^n(i, 2, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta y}{c \cdot \Delta t + \Delta y} \right] \cdot [E_z^{n+1}(i, 2, k) - E_z^n(i, 1, k)],$$

$$E_z^{n+1}(i, N_y + 1, k) = E_z^n(i, N_y, k) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta y}{c \cdot \Delta t + \Delta y} \right] \cdot [E_z^{n+1}(i, N_y, k) - E_z^n(i, N_y + 1, k)],$$

$$E_x^{n+1}(i, j, 1) = E_x^n(i, j, 2) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta z}{c \cdot \Delta t + \Delta z} \right] \cdot [E_x^{n+1}(i, j, 2) - E_x^n(i, j, 1)],$$

$$E_x^{n+1}(i, j, N_z + 1) = E_x^n(i, j, N_z) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta z}{c \cdot \Delta t + \Delta z} \right] \cdot [E_x^{n+1}(i, j, N_z) - E_x^n(i, j, N_z + 1)],$$

$$E_y^{n+1}(i, j, 1) = E_y^n(i, j, 2) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta z}{c \cdot \Delta t + \Delta z} \right] \cdot [E_y^{n+1}(i, j, 2) - E_y^n(i, j, 1)],$$

$$E_y^{n+1}(i, j, N_z + 1) = E_y^n(i, j, N_z) + \left[\frac{c \cdot \Delta t - \Delta z}{c \cdot \Delta t + \Delta z} \right] \cdot [E_y^{n+1}(i, j, N_z) - E_y^n(i, j, N_z + 1)].$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тестирование предлагаемого математического аппарата проводилось на модельной задаче, имеющей аналитическое решение. Проводился расчет распространения плоской волны, возбуждаемой импульсом поверхностного тока на бесконечной плоскости. Амплитудно-временная зависимость поверхностного тока определялась из соотношения

$$I(t) = 2.75 \cdot \left(e^{-\pi t / 10^{-8}} - e^{-4\pi t / 10^{-8}} \right), \quad [\text{A/m}]$$

и представлена на рис. 3. Протяженность трассы распространения составляла 900 м, параметры среды задавались величинами $N_e = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ и $v_e = 10^4 \text{ с}^{-1}$. В качестве граничных для численного решения брались условия Мура [4].

Размеры счетного объема брались $3 \times 3 \times 900 \text{ м}^3$ с ячейками $3 \times 3 \times 3 \text{ см}^3$. Количество ячеек составило $10^2 \times 10^2 \times 3 \times 10^4 = 3 \times 10^8$. При этом потребности в оперативной памяти превысили 15 Гб. Количество шагов по времени на интервале 4 мкс достигло 4×10^5 при величине шага $\Delta t = 0.01 \text{ нс}$.

На рис. 4 приведены результаты тестирования по величине напряженности электрического поля, которые показывают хорошее совпадение с аналитическим решением.

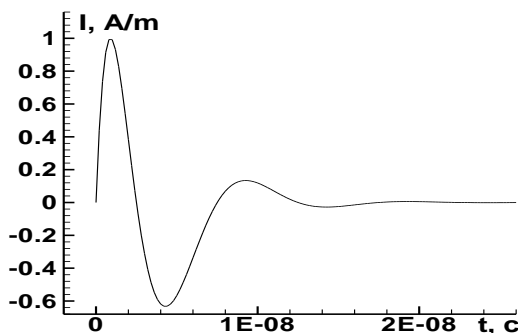


Рис. 3. Амплитудно-временная зависимость поверхностного тока

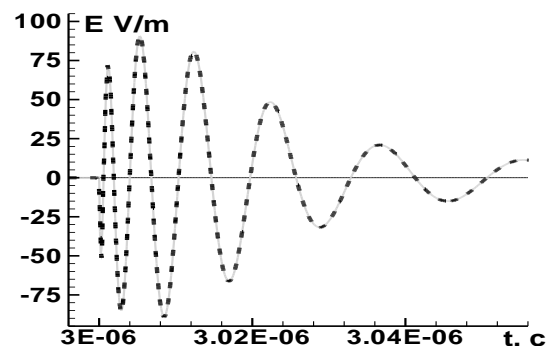


Рис. 4. Амплитудно-временная зависимость напряженности электрического поля, рассчитанная аналитически (сплошная линия) и численно (пунктирная линия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного математического аппарата, однако актуальным направлением дальнейших исследований является построение экономичной неявной численной схемы, позволяющей освободиться от ограничений, связанных с условием Куранта. Также дальнейшая доработка модели в целях обеспечения учета анизотропии ионосферной среды позволит расширить границы применимости предлагаемого математического аппарата. Кроме того, для решения задач распространения радиоволн по протяженным трассам необходимо проведение разработки специфических методов, позволяющих экономить вычислительные ресурсы ЭВМ, и алгоритмов параллельных многопроцессорных вычислений, обеспечивающих сокращение времени получения результата.

Список используемых источников

1. *Umran S. Inan, Robert A. Marshall. Numerical Electromagnetics // The FDTD Method.* – Cambridge University Press. – URL: www.cambridge.org (дата обращения: 17.05.2022).
2. *Марков Г. Т., Петров Б. М., Грудинская Г. П. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов.* – М.: Сов. радио, 1979. – 376 с.
3. *Курант Р., Фридрихс К., Леви Г. О разностных уравнениях математической физики // Успехи математических наук.* – 1941. – № 8. – С. 125–160.
4. *Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.* – 1981. – Vol. 23, № 4. – P. 377–382.

Ю. А. Летучий,
доктор технических наук, профессор

ИНДИКАТОРЫ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРЕЙ РОССИИ

Исследованы возможности индекса загрязненности воды и индикатора загрязнения моря для оценки эффективности природоохранной деятельности на море. Индикатор загрязнения моря (ИЗМ) рассчитывается по значениям индекса загрязненности воды (ИЗВ), представленным в ежегодниках «Качество морских вод по гидрохимическим показателям». ИЗМ позволяет ранжировать моря по степени химического загрязнения прибрежных районов.

Ключевые слова: индекс загрязненности воды, класс качества воды, государственный мониторинг водных объектов, химическое загрязнение акватории, индикатор загрязнения моря.

ВВЕДЕНИЕ

В статье анализируется возможность оценивания влияния природоохранной деятельности на экологическое состояние морей России в многолетней перспективе. Для этого привлекаются Ежегодники «Качество морских вод по гидрохимическим показателям» и «Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации...». В соответствии с Водным кодексом РФ [1] при государственном мониторинге водных объектов необходимо формировать количественные и качественные показатели их состояния с целью своевременного выявления и прогнозирования негативных процессов, влияющих на качество воды, оценки эффективности природоохранной деятельности, информационного обеспечения управления в области использования и охраны водных объектов.

ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Для оценки экологического состояния моря следует определить: уровень химического загрязнения водной среды и донных отложений, физические и биологические показатели его состояния, оценить и учесть устойчивость морской среды к антропогенному воздействию. Такой подход приводит к разработке весьма сложных экспертных систем, на его основе сформулированы идеи монографии [2]. В то же время в Ежегодниках [3] основным обобщенным формализованным показателем для характеристики качества морских вод по уровню гидрохимического загрязнения и сравнения по этому параметру различных акваторий последние 50 лет является расчетное значение индекса загрязненности воды (ИЗВ). В данной работе исследуются возможности использования ИЗВ в системе оценивания экологического состояния морей России. Формализованная комплексная оценка ИЗВ определяется по формуле:

$$\text{ИЗВ} = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{c_i}{\text{ПДК}_i}}{4}, \quad (1)$$

где c_i – концентрация трех наиболее значимых загрязнителей в обследуемой акватории с максимальным превышением ПДК_i . Четвертое слагаемое определяется путем деления $\text{ПДК}_4 = 6 \frac{\text{мгO}_2}{\text{дм}^3}$ для растворенного в воде кислорода на его измеренное значение c_4 .

Отметим, что справочник ПДК-2016 для морских вод содержит нормативы для 7 биогенных веществ, 25 металлов, 40 органических загрязняющих веществ и 7 показателей качества

воды рыбохозяйственного назначения. Для донных морских отложений ПДК не разработаны. По расчетному значению ИЗВ определяется класс качества воды в обследуемой акватории в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Классы качества воды в зависимости от диапазона значений ИЗВ

Диапазон значений ИЗВ	Класс качества воды	Оценка качества воды в баллах
$ИЗВ \leq 0,25$	I – очень чистые	1
$0,25 < ИЗВ \leq 0,75$	II – чистые	2
$0,75 < ИЗВ \leq 1,25$	III – умерено загрязненные	3
$1,25 < ИЗВ \leq 1,75$	IV – загрязненные	4
$1,75 < ИЗВ \leq 3,00$	V – грязные	5
$3,00 < ИЗВ \leq 5,00$	VI – очень грязные	6
$ИЗВ > 5,00$	VII – чрезвычайно грязные	7

Ежегодники «Качество морских вод по гидрохимическим показателям» (далее – «Качество...») [3] содержат в основном сведения о загрязнении морской среды в прибрежных районах, наиболее подверженных антропогенному воздействию в виде объектов коммунального хозяйства, судов промышленного, торгового и военно-морского назначения, промышленных предприятий, сельскохозяйственных предприятий и т. д. Обобщенные данные об уровне прибрежных загрязнений характеризуют антропогенную нагрузку, создаваемую государством на морскую среду того или иного моря.

На рис. 1 представлена динамика комплексного ИЗВ в бухте Золотой Рог Японского моря в 1984–2019 гг. За 35 лет не наблюдается изменение уровня загрязнения акватории. Как в 1984 г. ($ИЗВ = 1,76$), так и в 2018 г. ($ИЗВ = 1,81$) вода в бухте является «грязной» (V класс качества) в соответствии с табл. 1. Экстремальные значения класса качества воды отмечались в 2008 г. ($ИЗВ = 3,26$, «очень грязная») и 2015 г. ($ИЗВ = 0,81$, «умеренно загрязненная»), классы VI и III соответственно. Для проверки данного суждения по данным Ежегодников [3] для этой акватории получено уравнение линейной регрессии

$$= 1,8571 + 0,0009x. \quad (2)$$

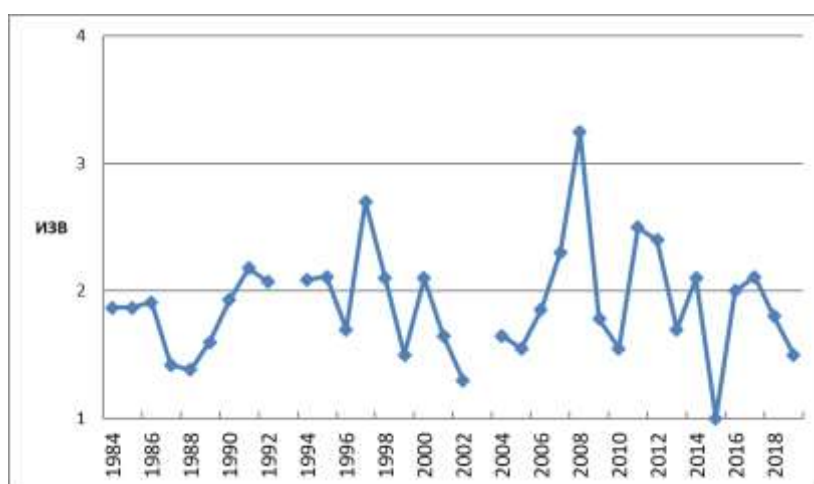


Рис. 1. Динамика комплексного ИЗВ в бухте Золотой Рог Японского моря за период с 1984 по 2019 г.

За этот же период времени для других акваторий в динамике ИЗВ, характеризующего изменение загрязненности, также была предпринята попытка выявить дрейф с помощью ли-

нейного регрессионного анализа. Попытки не привели к успеху. Так, для прибрежных вод Дагестанского взморья Каспийского моря (выборка за 35 лет) этот дрейф описывается уравнением регрессии [3]

$$y = 1,9298 - 0,0245x, \quad (3)$$

а для Кольского залива Баренцева моря (выборка за 21 год) – уравнением регрессии

$$y = 1,9551 - 0,0197x. \quad (4)$$

Стандартные проверки значимости уравнений (2)–(4) и статистической значимости коэффициентов регрессии в них дают основание с доверительной вероятностью 0,95 отвергнуть наличие дрейфа и учитывать только среднее значение ИЗВ за 20 и более лет. Однако величина оценки ИЗВ в локальном районе моря не может характеризовать уровень его химического загрязнения в целом.

Чтобы получить обобщенную оценку негативного влияния государства на химическое загрязнение моря следует рассчитать характеристику, учитывающую усредненное качество воды по всем обследуемым в процессе государственного мониторинга акваториям.

В качестве обобщенной оценки негативного влияния государства на загрязнение прибрежных акваторий моря предлагается «индикатор загрязненности моря» (ИЗМ). ИЗМ – качественная характеристика усредненного загрязнения ИЗВ по всем прибрежным акваториям контролируемого моря за значительный (десятилетия) промежуток времени, отображающая изменение класса качества воды в форме, наиболее удобной для непосредственного восприятия человеком как визуально, так и другим легко интерпретируемым способом. ИЗМ рассчитывается по формуле

$$\text{ИЗМ} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{ИЗВ}_i}{n}, \quad (5)$$

где ИЗВ_i – оценка качества воды в баллах (табл. 1) соответствующего класса качества воды для i -го района моря (от «очень чистых» до «чрезвычайно грязных»);
 n – число районов моря, в которых организован государственный мониторинг качества морских вод по гидрохимическим показателям на систематической основе.

Наблюдения за загрязнением Каспийского моря систематического характера представлены по станциям в районах Лопатина, Махачкалы, Каспийска, Дербента, на устьевых взморьях рек Терек, Самур, Сулак, на вековых разрезах о. Чечень – п-ов Мангышлак.

Наблюдения систематического характера за загрязнением Азовского моря представлены по станциям в районах дельты реки Кубань и реки Дон, Темрюкского залива, Таганрогского залива, взморья реки Кубань.

Результаты систематических наблюдений за загрязнением Черного моря представлены по станциям в районах Севастопольской бухты, акватории портов городов Ялта, Новороссийск, Геленджик, Анапа, Сочи, прибрежных вод района от реки Псоу до пос. Лазаревское.

Результаты систематических наблюдений за загрязнением Балтийского моря представлены по станциям в Невской губе (Центральная часть, Северный и Южный курортные районы, Морской торговый порт), в восточной части Финского залива (мелководная и глубоководная зоны, Копорская и Лужская губа).

По Белому морю систематические наблюдения представлены только по Кандалакшскому заливу. Наблюдения за загрязнением Баренцева моря представлены по станциям в торговом порту Мурманска, в Кольском заливе (южное, среднее и северное колено). Систематические наблюдения в прибрежной территории Охотского моря проводились в районе о. Сахалин (поселки Стародубское, Пригородное, порт Корсаков). По Японскому морю систематические наблюдения проводились в бухте Золотой Рог, Амурском заливе, Уссурийском заливе, заливе Находка, в Татарском проливе (прибрежная зона г. Александровка).

На рис. 2 приведены ИЗМ за период 2001–2019 гг. для шести морей, по которым имеются в ежегодниках «Качество...» достаточные сведения, обеспечивающие расчеты по формуле (5), представленной выше.

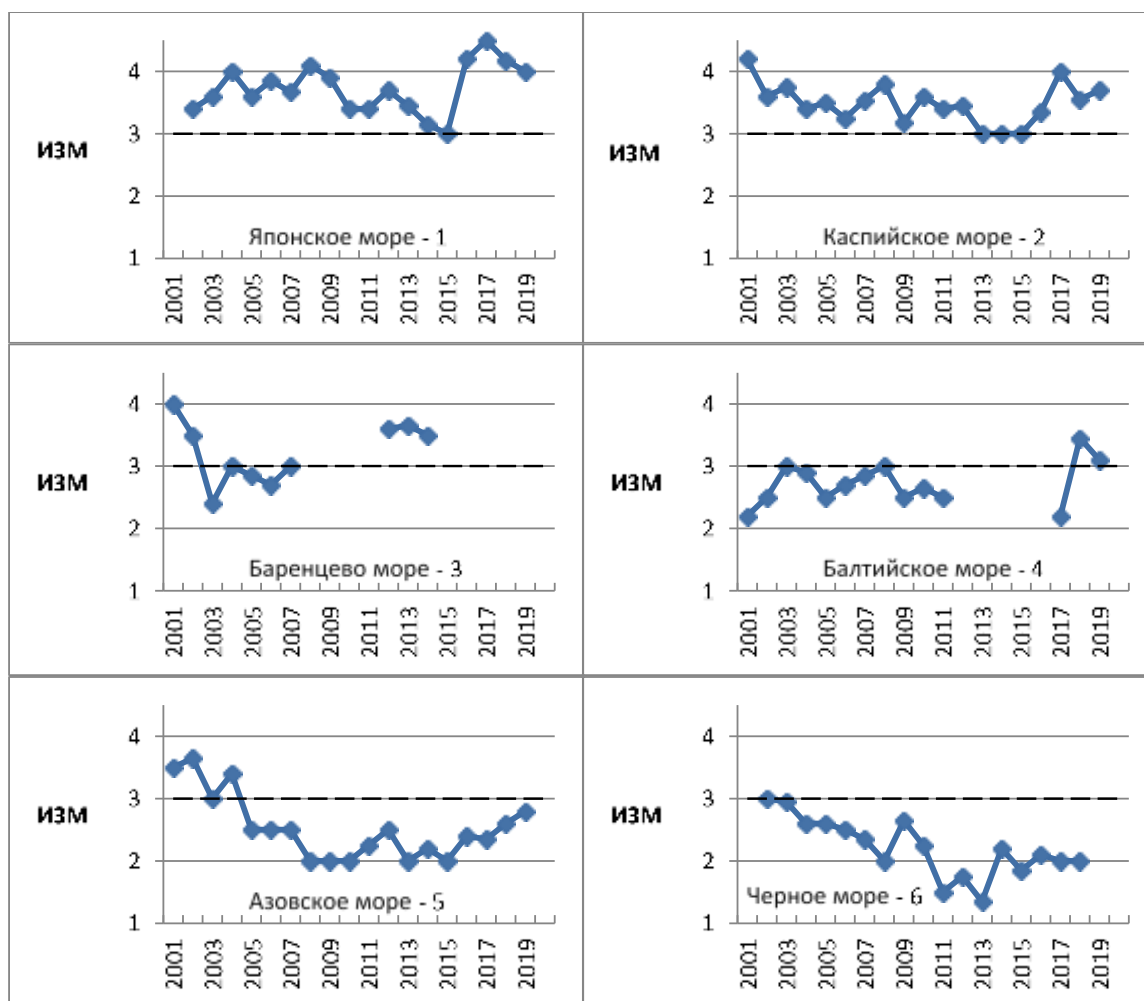


Рис. 2. Динамика ИЗМ в баллах для морей России за период с 2001 по 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя характеристики химического загрязнения прибрежной зоны в целом, можно сформулировать следующие выводы:

1. Показатели химического загрязнения моря ИЗВ и ИЗМ на временном интервале в несколько лет не эффективны для оценки природоохранной деятельности. Показатели ИЗМ на временном интервале от двух десятилетий могут быть полезны для ранжирования морей России по уровню химического загрязнения прибрежных акваторий. С этой целью показатели ИЗМ можно учитывать в экспертной системе информационного обеспечения управления в области использования и охраны морей. Следующие моря России по степени химического загрязнения располагаются за выбранный период в таком порядке (от большего загрязнения к меньшему):

1) Японское море – длительность регистрации класса качества «море очень грязное» составляет 100% (ИЗМ_{средн.} 3,793);

2) Каспийское море – длительность регистрации класса качества «море очень грязное» составляет 89%, «море грязное» – 11% (ИЗМ_{средн.} 3,54);

3) Баренцево море – длительность регистрации класса качества «море очень грязное» составляет 60%, «море грязное» – 40% ($ИЗМ_{\text{средн.}} = 3,457$);

4) Балтийское море – длительность регистрации класса качества «море очень грязное» составляет 17%, «море грязное» – 83% ($ИЗМ_{\text{средн.}} = 2,897$);

5) Азовское море – длительность регистрации класса качества «море очень грязное» составляет 16%, «море грязное» – 84% ($ИЗМ_{\text{средн.}} = 2,532$);

6) Черное море – длительность регистрации класса качества «море грязное» составляет 82%, «море загрязненное» – 18% ($ИЗМ_{\text{средн.}} = 2,223$ балла). Для Черного моря отмечается статистически значимое уменьшение к 2020 г. уровня загрязнения прибрежной акватории.

По Охотскому морю ИЗМ возможно определить только за период 2007–2017 гг., период наблюдения сократился более чем на 30%, что может влиять на достоверность оценки. Длительность регистрации класса качества «море очень грязное» составляет 23%, «море грязное» – 77% ($ИЗМ_{\text{средн.}} = 2,936$) (рис. 3). Отметим, что ранее моря России по степени деградации экосистем экологами располагались в ином порядке [2] – от большей к меньшей:

- 1) Азовское море;
- 2) Черное море;
- 3) Японское море;
- 4) Каспийское море;
- 5) Балтийское море;
- 6) Баренцево море.



Рис. 3. Динамика ИЗМ в баллах для Охотского моря за период с 2007 по 2019 гг.

2. Данным для расчета ИЗМ в морях Карское, Лаптевых, Белое, Восточно-Сибирское, Берингово, Чукотское в ежегодниках «Качество...» недостаточно. Анализ свидетельствует об ограниченных возможностях проведения государственного мониторинга на море и выяснения влияния природоохранной деятельности на экологическое состояние морей России в настоящее время.

Список используемых источников

1. Водный кодекс Российской Федерации (с изм. на 01.05.2022). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901982862> (дата обращения: 06.03.2022).

2. Байдуков А. К., Летучий Ю. А., Лобынцев В. В. Экологическая безопасность военно-морской деятельности. – СПб.: Наука, 2020. – 606 с.

3. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2020 / под ред. А. Н. Коршенко. – М.: Наука, 2021. – 230 с.

В. В. Лобынцев*,

кандидат технических наук, доцент;

М. В. Максимов**

кандидат технических наук;

И. Т. Мухаметшин**

*ЗАО «НПФ «АРГОС», г. Санкт-Петербург.

**Главное командование Военно-Морского Флота.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА

Корабли и суда ВМФ проектируются и строятся с учетом требований Конвенции МАРПОЛ 73/78, российского законодательства, иных нормативных актов и документов. Исполнить все требования к экологической безопасности кораблей и судов можно, только имея актуальные правовые и научно-технические знания, организационный механизм, технические и программные средства, включая информационную поддержку экипажа, средства предотвращения и ликвидации загрязнения морской среды. Организация обеспечения экологической безопасности сил ВМФ требует совершенствования. Рекомендованы первоочередные организационные меры и технические средства обеспечения экологической безопасности кораблей и судов ВМФ.

Ключевые слова: корабли, суда, экологическая безопасность, конвенция, морская среда, загрязнение, информационная поддержка, моделирование, экологическая экспертиза.

ВВЕДЕНИЕ

Военно-Морской Флот (далее – ВМФ) создает и поддерживает условия, необходимые для обеспечения безопасности морской деятельности Российской Федерации, обеспечивает ее военно-морское присутствие, демонстрацию флага России и военной силы государства в Мировом океане, принимает участие в борьбе с пиратством, в осуществляемых мировым сообществом военных, миротворческих и гуманитарных акциях, отвечающих интересам России, осуществляет заходы кораблей и судов в порты иностранных государств [1]. Во исполнение этих задач растет интенсивность плавания ВМФ, растут объемы потребляемого топлива, их нужно безопасно доставить в районы применения сил и подать на корабли и суда.

Из-за санкций сокращаются возможности пополнения запасов в иностранных портах, растет потребность в обеспечении сил топливом в море. Рост оборота нефтепродуктов объективно ведет к росту риска возникновения аварийных ситуаций с загрязнением морской среды.

ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ ВМФ

Требования к обеспечению экологической безопасности кораблей и судов ВМФ содержатся в международных конвенциях, нормативных правовых актах российского законодательства, иных нормативных актах и документах.

Экологическая безопасность – состояние защищенности окружающей среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [2].

Экологическая безопасность корабля (судна) – совокупность свойств корабля (судна), направленная на то, чтобы свести к минимуму риск загрязнения морской среды, вызванный конструктивной неисправностью, включая затопление или потерю водонепроницаемости [3].

Экологические требования, предъявляемые при проектировании, реконструкции, вводе в эксплуатацию, эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов, в полной мере распространяются на военные и оборонные объекты, вооружение и военную технику [2].

У кораблей (судов) ВМФ нет «иммунитета» от норм природоохранного законодательства.

Обеспечение экологической безопасности (далее – ОЭБ) в Вооруженных Силах России – это комплекс правовых, организационно-технических мер защиты от возможного негативного воздействия деятельности Вооруженных Сил, предотвращения и ликвидации экологических последствий чрезвычайных ситуаций на объектах Вооруженных Сил [4]. Следует понимать, что морская среда глобальна, ее состояние воздействует на все население планеты.

В полной мере это относится к кораблям и судам ВМФ, имеющим особенности: риск загрязнения морской среды на большой площади, плавание в международных и территориальных водах, особых районах и в портах иностранных государств. Главное – предотвратить или снизить до допустимого негативное воздействие корабля (судна) на морскую среду.

Указом Президента России [1] перед ВМФ поставлена задача «обеспечения экологической безопасности при эксплуатации кораблей и судов в мирное время».

Основной документ по ОЭБ кораблей (судов) – международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78) [5]. Основа ОЭБ кораблей (судов) ВМФ – максимально возможное исполнение Конвенции МАРПОЛ 73/78, других конвенций, кодексов и соглашений о предупреждении загрязнения морской среды с участием России [6, 7], законодательства России, приказов Министра обороны и Главнокомандующего ВМФ по ОЭБ.

МАРПОЛ 73/78 статьей 3 определяет, что «Конвенция не применяется к любым военным кораблям, военно-вспомогательным судам. Однако каждая сторона путем принятия соответствующих мер, не наносящих ущерба деятельности или эксплуатационным возможностям таких кораблей и судов, должна обеспечить, чтобы эти корабли и суда действовали, насколько это целесообразно и практически возможно, в соответствии с настоящей Конвенцией». По Решению заместителя Министра обороны № 235/1/11847 от 2015 г. [8] суда вспомогательного флота для ВМФ России проектируются и строятся с выполнением требований Конвенции МАРПОЛ 73/78 в полном объеме.

Вышеуказанными документами установлены более 80 технических и организационных требований ОЭБ к конструкции и оборудованию судов. Они содержатся и в иных документах органов власти России, в государственных и отраслевых стандартах, руководящих документах [9, 10]. Так, например, Росприроднадзор при проверках учитывает эти требования: документ [11] содержит 79 отдельных контрольных вопросов по ОЭБ кораблей и судов.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ ВМФ

Цель и главное требование к ОЭБ кораблей (судов) – снижение (предупреждение) их негативного воздействия на морскую среду, включая предупреждение и ликвидацию экологических последствий чрезвычайных ситуаций при повседневной деятельности. Для этого необходим учет источников этих негативных воздействий (загрязнений). Корабли (суда) при проектировании предусматривается наличие технических средств, предназначенных для предотвращения при нормальной эксплуатации корабля (судна) сброса (выброса) в морскую среду вредных веществ сверх норм, установленных конвенциями. К таким техническим средствам относятся:

1) в части предотвращения загрязнения нефтью – системы и цистерны сбора нефтесодержащих вод и отработанных масел, сепараторы нефтесодержащих вод с системами управле-

ния и защиты от сверхнормативного сброса нефти, средства выдачи указанных жидкостей на берег (на суда-сборщики), конструктивное обеспечение приема и выдачи (сброса) чистого балласта;

2) в части предотвращения загрязнения сточными водами – системы и цистерны их сбора, установки их обработки (обеззараживания), системы выдачи на берег (на суда-сборщики);

3) в части предотвращения сброса необработанного балласта – установки обеззараживания балластных вод, соответствующие насосы, системы и устройства управления;

4) в части предотвращения загрязнения мусором – емкости для сбора, помещения для временного хранения, устройства для безопасного сжигания (инсинераторы);

5) в части предотвращения сверхнормативных выбросов в атмосферу – использование сертифицированных двигателей и топлива с нормативным содержанием серы, контроль оборудования с озоноразрушающими веществами.

ОЭБ кораблей (судов) достигается, в частности, ведением достоверного учета веществ, вредных для морской среды, а также содержанием в исправности, правильной и эффективной эксплуатацией по назначению имеющихся на корабле (судне) технических средств ОЭБ.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Очевидна актуальность и потребность в информационной поддержке экипажей кораблей и судов ВМФ по ОЭБ. Для этого на суда ВМФ поставляется программно-аппаратный комплекс информационной поддержки по ОЭБ (далее – ПАК ИП ОЭБ), среди функций которого:

- обеспечение актуальными нормативными правовыми актами, документами;
- обработка сведений об источниках загрязнения морской среды с корабля (судна);
- руководство эксплуатацией специальных технических средств ОЭБ корабля (судна);
- документирование ОЭБ в повседневных условиях (отчетность и журналы по ОЭБ);
- составление донесений о загрязнении морской среды при авариях;
- моделирование и отображение распространения загрязняющих веществ в морской среде на цифровых морских картах, с учетом заложенных в базу справочных данных о гидрометеорологической обстановке в районах базирования и применения корабля (судна) (рис. 1);
- подготовка экипажа по ОЭБ в «привязке» к конкретному кораблю (судну) (возможно использование режимов самоподготовки обучаемых, а также тестирования или зачета).



Рис. 1. Пример отображения расчетной зоны загрязнения акватории нефтепродуктами

Указанные функции ПАК ИП ОЭБ позволяют спрогнозировать возможную аварию и подготовить экипаж к ликвидации ее последствий и оперативно принять решения для снижения вреда морской среде, а в международных водах – избежать ущерба национальным интересам России. Применяв уравнение (1), можно рассчитать параметры области загрязнения – максимальный радиус, время существования опасной области и изменение ее радиуса во времени:

$$\int_0^{\infty} J_0(\lambda r) J_1(\lambda) e^{-\lambda^2 t} dt = c_m, \quad (1)$$

где c_m – значение предельно допустимой концентрации загрязняющих веществ;
 r – радиус;
 t – время;
 J_0, J_1 – функции Бесселя I рода порядка 0 и 1;
 λ – волновое число ($\lambda > 0$).

Для моделирования распространения загрязнения по акватории и отображения на электронных картах используется двумерное уравнение турбулентной диффузии [12–14] (рис. 1).

База данных ПАК требует регулярной актуализации, при этом сбор данных осуществляется из различных источников информации.

ПАК ИП ОЭБ эксплуатируются на судах ВМФ: средний морской танкер «Академик Пашин» пр. 23130, большой морской сухогрузный транспорт «Яуза» пр. 550, экологическое судно «Пётр Градов» пр. 872Э, крановое судно-погрузчик «ВТР-79» пр. 20360, морской транспорт вооружения «Академик Ковалёв» пр. 20180ТВ, экологический катер «ЭК-1412» пр. 620Э.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Представленные выше технические средства ОЭБ применяются при нормальной эксплуатации корабля (судна). Однако возможны и аварийные ситуации, приводящие к сбросу или угрожающие сбросом в морскую среду загрязняющих веществ. По мировому опыту, большинство таких загрязнений связано с нефтепродуктами, что требует применения специальных технических средств ликвидации аварийного разлива нефтепродуктов (далее – ЛАРН).

В настоящее время разработана большая номенклатура специальных технических средств ЛАРН, значительно отличающихся между собой в зависимости от носителей, предназначения, производительности. К ним относятся палубные нефтесборные комплекты, плавающие боны, катера-бонопостановщики, боновые катушки (вьюшки), силовые агрегаты, нефтесборщики различных типов, сорбенты, шланги передачи и емкости хранения нефтеводяной смеси.

ВМФ обеспечивает ЛАРН только в пунктах базирования своих сил, так как ЛАРН в море возложена на «Морспасслужбу», подведомственную Минтрансу России [15].

С учетом вышеизложенного и документов [16] и [17] различными комплексами технических средств ЛАРН оснащены ряд судов ВМФ России: экологическое судно «Пётр Градов» пр. 872Э; экологический катер «ЭК-1412» пр. 620Э; суда комплексного портового обслуживания пр. 03180 (4 ед.); морские буксиры пр. 23470 (3 ед.); спасательно-буксирные суда пр. 22870 (6 ед.); ледокол «Илья Муромец» пр. 21180; средний морской танкер «Академик Пашин» пр. 23130; малые морские танкеры пр. 03182 (4 ед.); морские транспорты вооружения «Геннадий Дмитриев» и «Владимир Пялов» пр. 20360М.

Некоторые судовые комплексы ЛАРН дополнительно оснащены модулем производственного экологического контроля (далее – ПЭК) с программными и аппаратными средствами, позволяющими выполнять фото- и видеofиксацию операции ЛАРН, управление с помощью беспилотного летательного аппарата, документирование и отчетность, отбор и анализ проб воды и донного грунта из района аварии, контроль газового состава воздуха в районе ЛАРН.

При участии Главного командования ВМФ в настоящее время во исполнение решения заместителя Министра обороны России ведется инициативная работа «Разработка комплекса ликвидации аварийного разлива нефтепродуктов и производственного экологического контроля» (шифр ЛАРН-ИР). В результате станет возможным оснащать корабли, суда и береговые объекты ВМФ серийными комплексами, принятыми на снабжение Вооруженных Сил.

Целесообразно оснащать корабли и суда ВМФ палубными нефтесборными комплектами, предотвращающими попадание протечек нефтепродуктов в морскую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОЭБ кораблей (судов) ВМФ – сложный процесс, требующий взаимодействия органов военного управления и научно-исследовательских организаций ВМФ, промышленности [18]. В целях совершенствования этого процесса представляются целесообразными следующие меры:

1) продолжение разработки «Руководства по обеспечению экологической безопасности кораблей (судов) ВМФ» взамен утративших актуальность «Правил охраны природной среды в Военно-Морском Флоте» (ПОПС-90);

2) полноценный учет требований к ОЭБ кораблей и судов ВМФ при разработке технических заданий (тактико-технических требований), для чего необходимо выделение соответствующих специалистов (отдела, группы) в НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ;

3) организация плановой экологической экспертизы (экспертизы экологической безопасности) технических проектов кораблей и судов ВМФ, для чего необходима разработка соответствующего приказа Главнокомандующего ВМФ;

4) оснащение кораблей и судов ВМФ программно-аппаратными комплексами информационной поддержки экипажа по ОЭБ;

5) оснащение кораблей и судов ВМФ специальными техническими средствами ЛАРН применительно к предназначению корабля (судна). При этом все без исключения корабли и суда ВМФ необходимо оснащать палубными нефтесборными комплектами в количестве, соответствующем возможному разливам нефтепродуктов.

Список используемых источников

1. Основы государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2030 года. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201707200015> (дата обращения: 21.03.2022).

2. Об охране окружающей среды: федеральный закон № 7-ФЗ от 2002 г. – URL: <https://base.garant.ru/77322728/> (дата обращения: 21.03.2022).

3. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74) 1974 г. – URL: <https://base.garant.ru/71353064/> (дата обращения: 21.03.2022).

4. Положение об органах экологической безопасности Вооруженных Сил Российской Федерации [Утв. приказом Министра обороны РФ № 530 от 2015 г.]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725941.htm> (дата обращения: 21.03.2022).

5. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78). – URL: <https://base.garant.ru/2540818/> (дата обращения: 21.03.2022).

6. Конвенция по защите морской среды района Балтийского моря. – Хельсинки, 1992. – URL: <https://base.garant.ru/2563648/> (дата обращения: 21.03.2022).
7. Конвенция о защите Черного моря от загрязнения. – Бухарест, 1992. – URL: <https://base.garant.ru/1148132/> (дата обращения: 21.03.2022).
8. Об уточнении порядка технической приемки, контроля качества и взаимодействия военных представительств Минобороны, Российского морского регистра судоходства, предприятий-исполнителей при изготовлении и поставке судов вспомогательного флота для нужд Министерства обороны: решение заместителя Министра обороны № 235/1/1/11847 от 2015 г. – М.: МО РФ, 2015.
9. ГОСТ РВ 51638.2-2000. Экологическая безопасность вооружения и военной техники. Основные требования по обеспечению экологической безопасности. – М.: Госстандарт России, 2000.
10. Технический регламент о безопасности объектов морского транспорта [утв. постановлением Правительства РФ № 620 от 2010 г.]. – URL: <https://base.garant.ru/199085/#friends> (дата обращения: 21.03.2022).
11. Об утверждении формы проверочного листа (списка контрольных вопросов): приказ Росприроднадзора № 115 от 2022 г. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203010029> (дата обращения: 21.03.2022).
12. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
13. *Озмидов Р. В.* Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 280 с.
14. *Бестужева А. Н., Смирнов А. Л.* Динамика распространения диффундирующего вещества на поверхности и в толще воды // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2015. – Сер. 1, т. 2(60), вып. 4. – С. 589–599.
15. Правила организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации [утв. постановлением Правительства РФ № 2366 от 2020 г.]. – URL: <https://base.garant.ru/400167836/> (дата обращения: 21.03.2022).
16. Методическое Руководство по обеспечению экологической безопасности в Вооруженных Силах Российской Федерации [утв. заместителем Министра обороны РФ]. – М.: МО РФ, 2021.
17. Методика определения потребности в боновых заграждениях для предотвращения загрязнения акватории и локализации разлива нефтепродуктов [утв. ГК ВМФ 29.06.2020 г.]. – СПб.: Главное командование ВМФ, 2020.
18. *Байдуков А. К., Летучий Ю. А., Лобынцев В. В.* Экологическая безопасность военноморской деятельности / Академия военных наук Российской Федерации, Санкт-Петербургское региональное отделение. – СПб.: Наука, 2020. – 606 с.

П. М. Нагорский*,

доктор физико-математических наук, профессор;

К. Н. Пустовалов***,

кандидат физико-математических наук;

С. В. Смирнов*,

кандидат физико-математических наук

* Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск.

** Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск.

СУТОЧНЫЕ И СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ НЕВОЗМУЩЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ИХ СВЯЗЬ С ИЗМЕНЧИВОСТЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Проведен анализ суточных и сезонных вариаций невозмущенного электрического поля в условиях хорошей погоды на юге Западной Сибири на примере Томска. Показано, что суточные вариации градиента потенциала электрического поля характеризуются колебаниями континентального типа с двойным максимумом и минимумом, а их внутригодовые вариации – простой волной с минимумом летом и максимумом зимой. Получены оценки связи суточной и сезонной изменчивости градиента потенциала с изменчивостью некоторых геофизических величин. Показано, что доля вклада различных предикторов в изменчивость градиента потенциала, а также направление их корреляционной связи изменяется в течение суток.

Ключевые слова: атмосферное электричество, градиент потенциала, условия хорошей погоды, кривая Карнеги.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения характеристик атмосферного электричества в приземном слое проводятся уже более 150 лет и дают информацию как о локальном электрическом состоянии, так и о функционировании всей Глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1–3]. Осредненная суточная вариация градиента потенциала электрического поля, известная как кривая Карнеги или унитарная вариация, которая соответствует универсальному времени и не зависит от места измерения, представляет собой глобальный ежедневный вклад электрической активности в районах нарушенной погоды (нижняя облачность, осадки, грозы и др.) [4, 5]. Однако, вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на суточные вариации приземного электрического поля в различных регионах земного шара [6–13]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных природных и антропогенных факторов, для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости электрических величин в различных регионах Земли [14]. С другой стороны, высокая чувствительность приземного электрического поля к локальным условиям может быть использована для решения обратной задачи – получения информации о различных процессах и явлениях на основе их отклика в электрическом поле, для реализации которой также необходимо получение надежных оценок невозмущенных (фоновых) значений электрического поля в конкретном пункте. К настоящему времени подробный анализ вариаций электрического поля в условиях хорошей погоды, а также влияющих на них факторов выполнен для ряда регионов земного шара, однако на территории юга Западной Сибири подобные исследования не проводились.

В связи с вышесказанным, целью данного исследования является оценка изменчивости градиента потенциала электрического поля в условиях хорошей погоды и ее связи с изменчивостью основных геофизических (в основном, метеорологических) величин на юге Западной Сибири на примере Томска.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Исследование было основано на анализе данных измерений геофизических величин, выполняемых в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС) [15], которая располагается в восточной части г. Томска ($56,48^\circ$ с.ш. и $85,05^\circ$ в.д.) на высоте 167 м над уровнем моря. Анализировался временной ряд среднeminутных значений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) за период с 2006 по 2020 г. Измерение $\nabla\varphi$ на ГО ИМКЭС с 2006 по 2017 г. выполнялись с помощью электростатического флюксметра «Поле-2», а с 2015 г. по настоящее время – флюксметром «CS110». Флюксметр «Поле-2» произведен и откалиброван в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (СССР/Россия). Он измеряет $\nabla\varphi$ в диапазоне ± 5000 В/м с точностью $\pm 5\%$. Калибровка «Поле-2» выполнялась с помощью калибратора (эталона) напряженности электрического поля КНЭП-1М (диапазон ± 5000 В/м, точность 1,5 %). Флюксметр «Поле-2» имеет два измерительных канала: ± 500 В/м с разрешением около 0,6 В/м и ± 5000 В/м с разрешением 6 В/м. Флюксметр «CS110» был произведен и откалиброван компанией *Campbell Scientific* (США). Он измеряет $\nabla\varphi$ в диапазоне ± 22300 В/м с точностью $\pm 5\%$. Флюксметр «CS110» имеет два диапазона измерения: ± 2200 В/м с разрешением 0,32 В/м и ± 22300 В/м с разрешением 3,2 В/м и автоматическое переключение между ними.

Для интерпретации изменчивости $\nabla\varphi$ и анализа его связи с изменчивостью геофизических величин были использованы данные синхронных измерений метеорологических и геофизических величин (с осреднением 1 мин), полученные в ГО ИМКЭС с 2006 г. (температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, солнечная радиация, радиационный фон). Температура (T) и относительная влажность (f) воздуха регистрировались датчиком «HMP-45D» (*Vaisala*, Финляндия), а атмосферное давление – датчиком «MPX4115AP» (*Motorola*, США). Для измерения скорости ветра (V) использовался анеморумбометр «М-63» (Гидрометприбор, Россия). Поток суммарного солнечного излучения (Q) регистрировался с помощью пиранометра «СМ11» (*Kipp&Zonen*, Нидерланды). Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (γ) измерялась с помощью дозиметра ИРФ-3Т (Экотехнология, Россия), основанного на счетчиках Гейгера – Мюллера, преобразующих энергию ионизирующего излучения в электрические импульсы. Для оценки содержания аэрозоля в столбе атмосферы, соответствующего измерениям $\nabla\varphi$, были использованы данные многоканального фильтрового радиометра NILU-UV-6Т. Радиометр измеряет энергетическую освещенность в ультрафиолетовой (УФ) и видимой спектральных областях на длинах волн 305, 312, 320, 340 и 380 нм и в диапазоне 400–700 нм. Прилагаемое к прибору программное обеспечение позволяет рассчитывать средние, максимальные и суммарные суточные значения энергетической освещенности в областях УФ-А (315–400 нм), УФ-В (280–315 нм), фотосинтетически активного излучения (400–700 нм), эритемного и биологически активного УФ-излучения, общее содержание озона, а также прозрачность атмосферы на длине волны 340 или 380 нм (CLT), обусловленную облачностью и атмосферным аэрозолем. Поскольку в условиях хорошей погоды наличие нижней облачности исключается, то изменение CLT обусловлено, главным образом, изменением содержания аэрозоля в столбе атмосферы. В данной работе были использованы значения CLT , рассчитанные для 380 нм:

$$CLT_{380} = E_{e(\text{изм.})} / E_{e(\text{ясно})} \cdot 100\%,$$

где $E_{e(\text{изм.})}$ и $E_{e(\text{ясно})}$ – измеряемая и модельная (ясное небо) энергетическая освещенность.

При отборе случаев, соответствующих условиям хорошей погоды, использовались данные синоптических наблюдений за облачностью и явлениями на гидрометеорологической станции «Томск» (WMO ID 29430) [16], расположенной в 6 км от ГО ИМКЭС. Для исследования, исходя из методических указаний [17], использовались только случаи (3-часовые интервалы), для которых выполнялись следующие условия: количество облаков не более 5 баллов;

отсутствуют нижняя облачность и облака вертикального развития; отсутствуют грозы, осадки, туман, мгла, метель, пыльная буря и задымление; средняя скорость ветра не более 6 м/с.

Далее отбирались вариации $\nabla\phi$, соответствующие отобранным интервалам времени, и производился их статистический анализ. При этом значения $\nabla\phi$ больше 1000 В/м и меньше -500 В/м, не характерные для невозмущенных атмосферных условий и, предположительно, связанные с неучтенным влиянием дополнительных природных и антропогенных факторов, из дальнейшего анализа исключались.

СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ НЕВОЗМУЩЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТОМСКЕ

Результаты анализа изменчивости $\nabla\phi$ в условиях хорошей погоды в Томске по данным наблюдений на ГО ИМКЭС за период 2006–2020 гг. представлены на рис. 1. Среднегодовой суточный ход $\nabla\phi$ имеет характерный вид с утренним минимумом (~ 7 ч) и вечерним максимумом (~ 21 ч), который согласно классификации [1–3, 10, 18, 19] соответствует континентальному типу. В летние месяцы также наблюдаются вторичный максимум и минимум (~10 и 13 ч соответственно), обусловленные конвективным генератором.

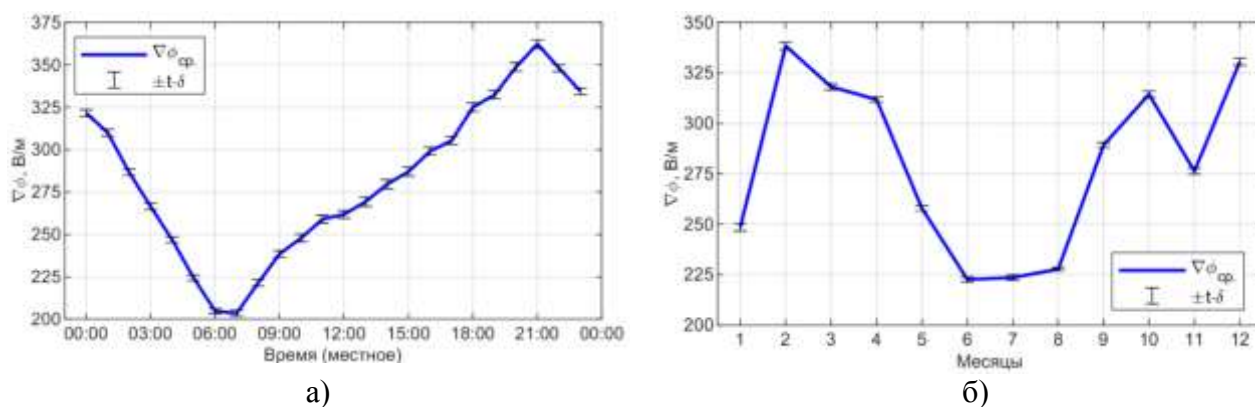


Рис. 1. Среднегодовой суточный (а) и многолетний годовой (б) ходы $\nabla\phi$ в условиях хорошей погоды в Томске, рассчитанные по данным измерений на ГО ИМКЭС за период 2006–2020 гг. ($\pm t \cdot \delta$ – доверительный интервал, где t – коэффициент Стьюдента, δ – стандартная ошибка среднего арифметического, равная σ/\sqrt{N} , где σ – стандартное отклонение, N – длина выборки)

Как показали оценки, в Томске амплитуда среднегодового суточного хода $\nabla\phi$ составляет ~ 56 % от многолетнего среднего значения $\nabla\phi = 282$ В/м. Это хорошо согласуется со значениями, полученными в других континентальных пунктах наблюдения [1–3]. Однако в зимние месяцы суточная амплитуда $\nabla\phi$ значительно превосходит многолетнее среднее значение, увеличиваясь на 100 %. Среднегодовой суточный ход $\nabla\phi$, нормированный относительно многолетнего среднего значения $\nabla\phi$, в Томске согласуется с унитарной вариацией (кривой Карнеги) [4], однако его минимум и максимум сдвинуты на более раннее время – на 3 и 5 ч соответственно.

Сезонную изменчивость $\nabla\phi$ в условиях хорошей погоды в Томске можно приближенно описать простой волной с минимумом летом и максимумом зимой, что в целом также хорошо согласуется с оценками, полученными для других регионов земного шара [1–3]. Как видно на рис. 1, б, в годовом ходе максимальное значение $\nabla\phi$ отмечается в феврале, минимальное – в июне. Из общей тенденции выбиваются лишь ноябрь и январь, для которых среднемесячные значения $\nabla\phi$ являются более низкими, чем в соседние месяцы. Дисперсия

значений $\nabla\varphi$ также значительно увеличивается от лета к зиме. Внутригодовая изменчивость среднемесячных значений $\nabla\varphi$ составляет 41 % от его многолетнего среднего значения, что согласуется с оценкой для северного полушария, равной 48 % [1–3].

СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В УСЛОВИЯХ ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ В ТОМСКЕ

Анализ связи суточных и сезонных вариаций градиента потенциала электрического поля и вариаций основных геофизических величин в условиях хорошей погоды в Томске (рис. 2 и 3) показал, что изменчивость невозмущенного электрического поля в значительной степени определяется локальными факторами (метеорологическими и геофизическими условиями), накладывающимися на отклик глобальных процессов планетарного масштаба [4].

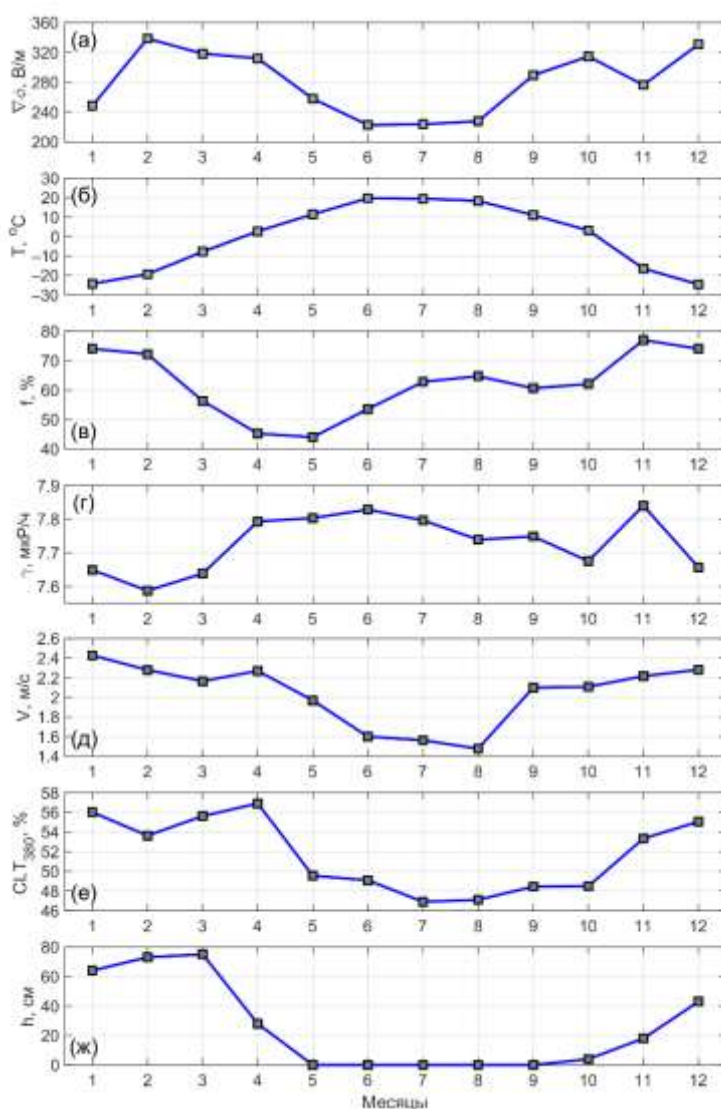


Рис. 2. Сезонные вариации среднемесячных значений градиента потенциала электрического поля (а), температуры (б), относительной влажности (в), γ -излучения (г), скорости ветра (д) и прозрачности атмосферы (е) в условиях хорошей погоды, а также высоты снежного покрова (ж) в Томске

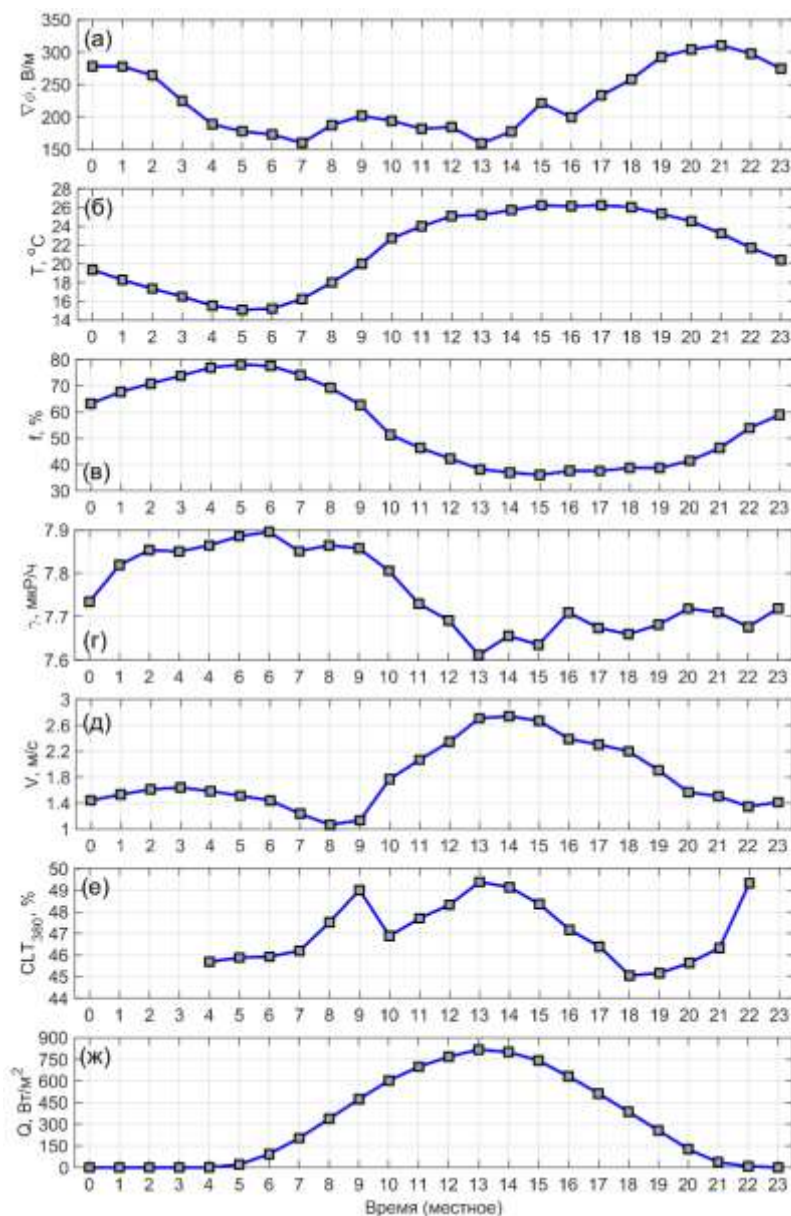


Рис. 3. Суточные вариации среднечасовых значений градиента потенциала электрического поля (а), температуры (б), относительной влажности (в), γ -излучения (г), скорости ветра (д), прозрачности атмосферы (е) и суммарной солнечной радиации (ж) в условиях хорошей погоды в Томске в июле

Согласно рис. 4, сезонная изменчивость $\nabla\phi$ в значительной степени определяется изменчивостью радиационного фона (на примере γ -фона) и аэрозольного загрязнения воздуха (на примере CLT_{380}), которые, в свою очередь, тесно связаны с изменениями температуры воздуха, скорости ветра и высоты снежного покрова.

Сезонные изменения γ -фона и температуры воздуха, согласно табл. 1, объясняют 37 % изменчивости $\nabla\phi$. Вариации содержания аэрозоля в атмосфере и высоты снежного покрова описывают 33 % изменчивости $\nabla\phi$. Наибольшую долю дисперсии $\nabla\phi$ (55 %) можно объяснить изменениями скорости ветра. Однако влияние этого фактора на электрическое поле является косвенным и, предположительно, обусловлено перераспределением в приземном слое посредством конвективных потоков и турбулентного перемешивания радона и его дочерних продуктов (радионуклидов) и аэрозольных частиц.

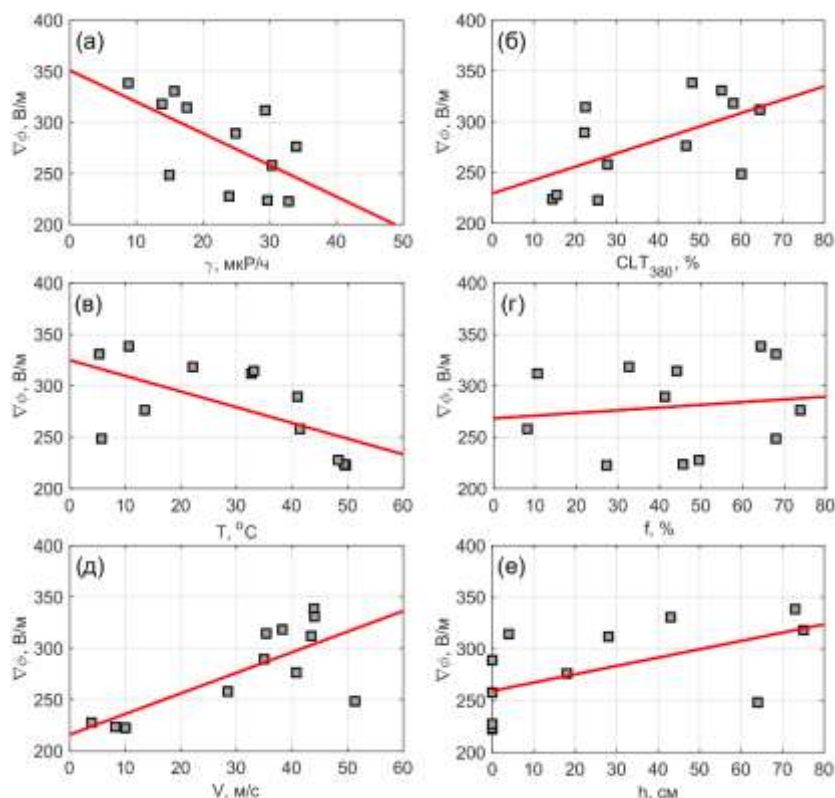


Рис. 4. Зависимость среднемесячных значений градиента потенциала электрического поля от среднемесячных значений мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (а), прозрачности атмосферы на длине волны 380 нм (б), температуры (в) и влажности (г) воздуха, скорости ветра (д) и высоты снежного покрова (е) в условиях хорошей погоды в Томске

Таблица 1

Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации для зависимостей среднемесячных значений градиента потенциала от среднемесячных значений мощности дозы гамма-излучения, прозрачности атмосферы на 380 нм, температуры и влажности воздуха, скорости ветра и высоты снежного покрова в условиях хорошей погоды в Томске

Предиктор	Уравнение регрессии и коэффициент детерминации
γ	$y = -309,7 \cdot x + 2674; R^2 = 0,37$
CLT_{380}	$y = 6,611 \cdot x - 61,67; R^2 = 0,33$
T	$y = -1,528 \cdot x + 279; R^2 = 0,37$
f	$y = 0,5276 \cdot x + 247,1; R^2 = 0,02$
V	$y = 100,2 \cdot x + 75,79; R^2 = 0,55$
h	$y = 0,8054 \cdot x + 259,5; R^2 = 0,33$

Согласно рис. 5, суточную изменчивость градиента потенциала электрического поля в условиях хорошей погоды в Томске можно в значительной степени объяснить изменением количества солнечной радиации, обуславливающим изменение температуры и влажности воздуха и интенсивности конвективных и турбулентных потоков в приземном слое воздуха.

Последние вызывают перераспределение в атмосфере радона и радионуклидов, а также подъём с подстилающей поверхности и последующий перенос аэрозольных частиц. При этом доля вклада каждого из предикторов (прямой или косвенный) в изменчивость $\nabla\phi$ отличается в различное время суток.

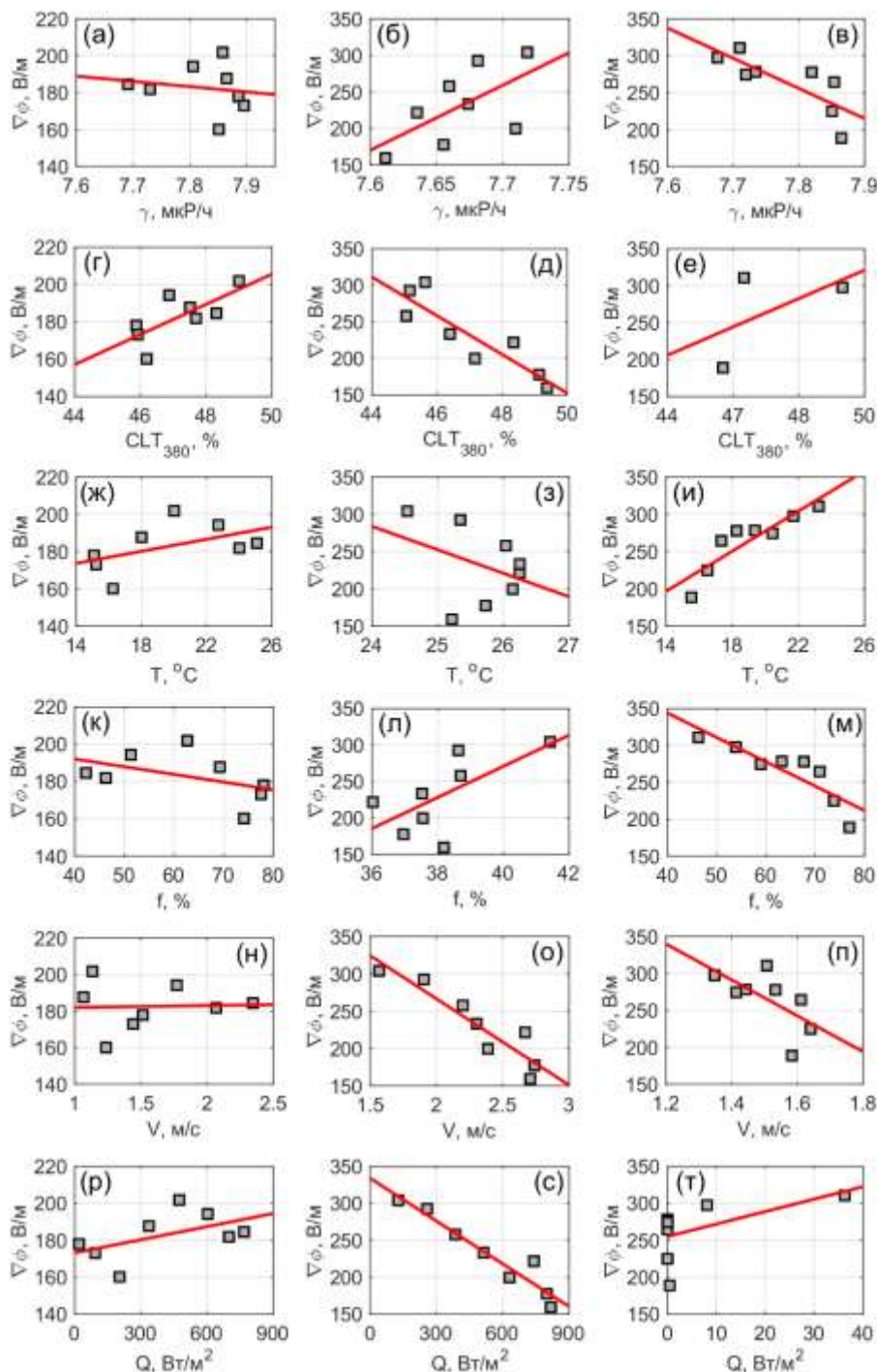


Рис. 5. Зависимость среднечасовых значений градиента потенциала электрического поля от среднечасовых значений мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (а, б, в), прозрачности атмосферы на длине волн 380 нм (г, д, е), температуры (ж, з, и) и влажности (к, л, м) воздуха, скорости ветра (н, о, п) и интенсивности суммарной солнечной радиации (р, с, т) в условиях хорошей погоды в Томске отдельно для периодов 05:00–12:00 (а, г, ж, к, н, р), 13:00–20:00 (б, д, з, л, о, с) и 21:00–04:00 (в, е, и, м, п, т) на примере июля

В суточном ходе можно выделить как минимум 3 периода с влиянием различных факторов на изменчивость $\nabla\varphi$:

- 1) от рассвета до полудня;
- 2) от периода максимального прогрева до начала заката;
- 3) от заката до начала рассвета.

Так, согласно табл. 2, в июле в первый период (~05:00–12:00) более половины изменчивости объясняет лишь изменение содержания аэрозоля (53 %). Изменение солнечного излучения, температуры и влажности воздуха в этот период объясняют 27, 25 и 21 %. Во второй период (~13:00–20:00) изменение солнечного излучения, скорости ветра и содержания аэрозоля объясняют более 3/4 дисперсии $\nabla\varphi$ (92, 85 и 80 % соответственно). Изменение относительной влажности воздуха, радиационного фона и температуры воздуха в данный период объясняет 43, 38 и 14 % изменчивости $\nabla\varphi$ соответственно. В заключительный период (~21:00–04:00) изменение $\nabla\varphi$ объясняется более чем на 3/4 изменчивостью температуры и относительной влажности воздуха (80 и 76 % соответственно) и более чем на половину изменением радиационного фона (62 %). Вклад изменения скорости ветра и солнечного излучения (в сумерках) в изменчивость $\nabla\varphi$ в этот период – 39 и 29 % соответственно.

Таблица 2

**Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации
для зависимостей среднечасовых значений градиента потенциала
от среднечасовых значений мощности дозы гамма-излучения,
прозрачности атмосферы на 380 нм, температуры и влажности воздуха,
скорости ветра и потока суммарной солнечной радиации
в условиях хорошей погоды в Томске
в различное время суток на примере июля**

Предикторы	Периоды (время местное)		
	05:00–12:00	13:00–20:00	21:00–04:00
γ	$y = -28,38 \cdot x + 404,6;$ $R^2 = 0,03$	$y = 890,1 \cdot x - 6595;$ $R^2 = 0,38$	$y = -408,3 \cdot x - 3440;$ $R^2 = 0,62$
CLT_{380}	$y = 8,069 \cdot x - 198;$ $R^2 = 0,53$	$y = -26,52 \cdot x - 1478;$ $R^2 = 0,80$	не оценивались из-за недостаточности данных
T	$y = 1,61 \cdot x - 151,2;$ $R^2 = 0,25$	$y = -31,42 \cdot x - 1038;$ $R^2 = 0,14$	$y = 13,43 \cdot x - 8,728;$ $R^2 = 0,80$
f	$y = -0,4124 \cdot x - 208,5;$ $R^2 = 0,21$	$y = 21,28 \cdot x - 580,6;$ $R^2 = 0,43$	$y = -3,301 \cdot x - 475,7;$ $R^2 = 0,76$
V	$y = 1,022 \cdot x - 181,1;$ $R^2 = 0,001$	$y = -115,5 \cdot x - 497,7;$ $R^2 = 0,85$	$y = -243,2 \cdot x - 631,9;$ $R^2 = 0,39$
Q	$y = 0,02367 \cdot x - 173,2;$ $R^2 = 0,27$	$y = -0,1929 \cdot x - 333,8;$ $R^2 = 0,92$	$y = 1,684 \cdot x - 255,2;$ $R^2 = 0,29$

Кроме того, можно отметить, что в течение суток также меняется направление корреляционной связи градиента потенциала и величин предикторов. Это отмечается в большей или меньшей степени для большинства предикторов (рис. 5, табл. 2). Например, в утреннее время корреляционная связь между $\nabla\varphi$, с одной стороны, и потоком солнечного излучения, температурой воздуха и прозрачностью атмосферы (содержанием аэрозоля) является положительной, в послеполуденное время – отрицательной, в ночное – снова положительной. Для связи $\nabla\varphi$ с радиационным фоном и относительной влажностью ситуация противоположная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ суточных и сезонных вариаций градиента электрического поля в условиях хорошей погоды на юге Западной Сибири на примере Томска. Отмечено, что суточные вариации $\nabla\varphi$ характеризуются колебаниями континентального типа с двойным максимумом и минимумом. Основным минимум и максимум вариаций приходится в среднем на 7 и 21 ч местного времени. Внутригодовую изменчивость среднемесячных значений $\nabla\varphi$ можно приближенно описать простой волной с минимумом летом и максимумом зимой.

Получены оценки связи суточной и сезонной изменчивости невозмущенного электрического поля с изменчивостью геофизических величин. Отмечено, что сезонная изменчивость $\nabla\varphi$ в значительной степени определяется изменчивостью радиационного фона и аэрозольного загрязнения воздуха, которые, в свою очередь, тесно связаны с изменениями температуры, скорости ветра и снежного покрова. Суточную изменчивость $\nabla\varphi$ в Томске можно объяснить изменением солнечной радиации, с которым связаны изменения температуры и влажности воздуха, а также изменения интенсивности конвективных и турбулентных потоков, обуславливающих перераспределение радионуклидов и аэрозольных частиц. Показано, что доля вклада различных предикторов в изменчивость градиента потенциала, а также направление их корреляционной связи изменяется в течении суток.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, № 22-27-00482 (<https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>).

Список используемых источников

1. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 420 с.
2. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 323 с.
3. *Israël H.* Atmospheric Electricity. – Springfield: NTIS, U.S. department of Commerce, 1973. – Vol. 2. – 570 с.
4. *Harrison R. G.* The Carnegie Curve // *Surveys in Geophysics.* – 2013. – Vol. 34. – P. 209–232.
5. *Mezuman K., Price C., Galanti E.* On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells // *Environmental Research Letters.* – 2014. – Vol. 9 (12). – P. 124023.
6. *Bennett A. J., Harrison R. G.* Variability in surface atmospheric electric field measurements // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2008. – Vol. 142. – P. 012046.
7. Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation / S. V. Anisimov [et al.] // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* – 2014. – Vol. 50. – P. 390–398.
8. Atmospheric electric field measurements in urban environment and the pollutant aerosol weekly dependence / H. G. Silva [et al.] // *Environmental Research Letters.* – 2014. – Vol. 9. – P. 114025.
9. *Adzhiev A. K., Kupovykh G. V.* Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* – 2015. – Vol. 51. – P. 633–638.
10. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel / R. Yaniv [et al.] // *Atmospheric Research.* – 2016. – Vol. 172–173. – P. 119–125.
11. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes / J. Tacza [et al.] // *Atmospheric Research.* – 2021. – Vol. 248. – P. 105200.

12. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient / N. Ahmad [et al.] // *Advances in Space Research*. – 2021. – Vol. 67. – P. 2491–2503.

13. The Electric Field of the Undisturbed Atmosphere in the South of Western Siberia: A Case Study on Tomsk / K. N. Pustovalov [et al.] // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13. – P. 614.

14. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research / K. A. Nicoll [et al.] // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2019. – Vol. 184. – P. 18–29.

15. Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН): сайт. – URL: <http://www.imces.ru/> (дата обращения: 28.06.2022).

16. ВНИИГМИ-МЦД: сайт. – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 28.06.2022).

17. РД-52.04.168-88. Методические указания. Наблюдения за атмосферным электричеством на станциях. – М.: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, 1989. – 35 с.

18. *Имянитов И. М., Чубарина Е. В.* Электричество свободной атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965. – 240 с.

19. Атмосфера: справочник (справочные данные, модели) / под ред. Ю. С. Седунова [и др.]. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 509 с.

Л. Д. Рослов;
В. В. Семенов,
кандидат технических наук;
К. И. Чувирова

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДАЛЬНОМ ИК-ДИАПАЗОНЕ В РАЙОНАХ, НЕ ОСВЕЩЕННЫХ ДАНЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Представлен Метод оценивания характеристик прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне в районах, не освещенных данными метеорологических наблюдений, и оценки его качества по точности оценивания коэффициента прозрачности атмосферы в сравнении с аналогичными методами на примере одного физико-географического района.

Ключевые слова: коэффициент прозрачности атмосферы, тепловизионная полезная нагрузка, ИК-излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Основными элементами организации планирования полетов летательных аппаратов (ЛА), оснащенных тепловизионной полезной нагрузкой (ТПН) являются: организация полетов ЛА, определение исходных данных для планирования полетов и предварительная подготовка к ним. На данных этапах осуществляется расчет дальности действия ТПН с учетом оптимального угла обзора, заданной вероятности выявления определенных классов объектов и их излучательных характеристик. Рассчитанная дальность действия ТПН напрямую влияет на высоту полета ЛА и должна корректироваться в зависимости от прогнозируемых или фактических метеорологических условий. В настоящее время данная задача не решена.

При расчете дальности действия ТПН необходимо обладать информацией об ослабляющем инфракрасное излучение слое атмосферы между приемником оптического излучения и подстилающей поверхностью [2–5]. Данная задача усложняется если в районе применения отсутствуют данные метеорологических наблюдений.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПОРЯДОК ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

В ходе исследований, проведенных авторами [6, 7], был разработан метод оценивания характеристик прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне в районах, не освещенных данными метеорологических наблюдений (далее – Метод). Общая структурная схема Метода представлена на рис. 1.

В данном Методе к характеристикам прозрачности относятся:

- коэффициент поглощения водяного пара $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$;
- коэффициент поглощения углекислого газа $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$;
- коэффициент аэрозольного ослабления $\tau_a(\lambda)$;
- коэффициент прозрачности атмосферы τ_0 ;
- другие числовые характеристики, с помощью которых вычисляются вышеперечисленные характеристики [8–11].

Для представления и понимания структуры Метода дадим его последовательное описание.

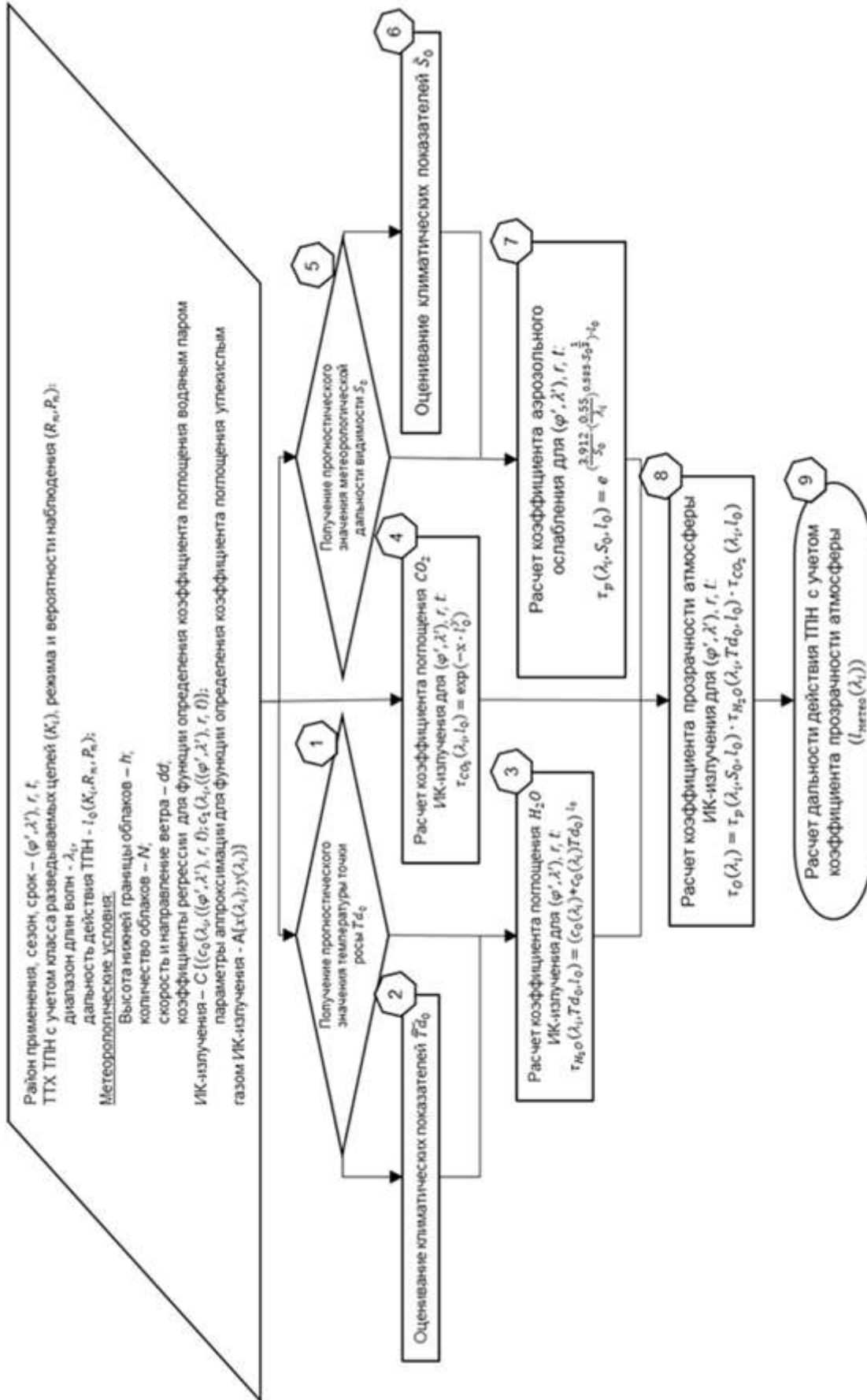


Рис. 1. Структурная схема Метода

В качестве исходных данных задаются:

– тактико-технические исходные данные: координаты района применения ЛА с ТПН (φ', λ') , сезон года (r) , срок прогнозирования (t) ; высота и скорость полета ЛА; максимальная дальность действия ТПН (l_0) ; диапазон длин волн функционирования ТПН (λ_i) ; класс обнаруживаемой цели (K_i) , заданная вероятность наблюдения (P_n) и режим наблюдения (R_n) . Перечисленные тактико-технические данные метода задаются априори при подготовке полетного задания БЛА;

– метеорологические исходные данные: срок; климатические показатели или прогностические значения температуры точки росы $(T\tilde{d}_0)$ у земли и метеорологической дальности видимости (\tilde{S}_0) ; параметры аппроксимации для определения коэффициента поглощения водяного пара $C[c_0(\lambda_i, (\varphi', \lambda'), r, t); c_1(\lambda_i, (\varphi', \lambda'), r, t)]$; параметры аппроксимации для определения коэффициента поглощения углекислого газа $A[x(\lambda_i), y(\lambda_i)]$ [12].

В блоке 1 (рис. 1) выполняется условие получения прогностического значения температуры точки росы для расчета коэффициента поглощения водяного пара инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне для соответствующего района и времени планируемого применения БЛА. Если отсутствуют прогностические значения, то происходит оценивание $T\tilde{d}_0$ для соответствующих условий в блоке 2. Полученные значения температуры точки росы поступают в блок 3, на котором определяется коэффициент поглощения водяным паром инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне [7].

Аналогичные действия происходят в блоках 5 и 6 по определению значения \tilde{S}_0 и в блоке 7 для определения коэффициента аэрозольного ослабления.

В блоке 4 производится расчет коэффициента поглощения углекислым газом инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне (τ_{CO_2}) для заданных исходных данных. В данном блоке используется функция, полученная А. Г. Шипуновым [13], при помощи которой вычисляется толщина поглощаемого слоя атмосферы (l_0) , определяемая максимальной дальностью действия ТПН.

В блоке 8 производится расчет коэффициента прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне.

При разработке метода приняты следующие допущения и ограничения:

– для получения коэффициентов регрессии $C[c_0(\lambda_i, (\varphi', \lambda'), r, t); c_1(\lambda_i, (\varphi', \lambda'), r, t)]$ выбирается архив многолетних наблюдений ближайшей к району применения БЛА метеорологической станции;

– ЛА применяется для проведения оперативного наблюдения в автономном режиме;

– атмосфера на всем протяжении участка полета ЛА считается однородной;

– дальность действия ТПН определяется тактико-техническими характеристиками (ТТХ) приемной матрицы, размером чувствительного элемента, фокусным расстоянием и углом наклона ТПН относительно земной поверхности;

– толщина поглощающего слоя атмосферы определяется максимальной дальностью действия ТПН;

– излучательные характеристики объектов наблюдения и фона имеют контрасты для их надежной селекции;

– ТПН функционирует в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм;

– полеты ЛА производятся под облаками.

На этапе подготовки полетного задания для ЛА в качестве температуры точки росы используются среднесрочные климатические показатели. Но следует заметить, что при получении ее фактических значений (например, с ЛА-разведчика погоды за предыдущие циклы наблюдения путем установки соответствующих датчиков на борту ЛА) можно уточнять статистическую модель определения коэффициента поглощения водяным паром и при этом автоматически корректировать расчеты в реальном режиме времени.

К преимуществам разработанного Метода, по сравнению с существующими аналогичными методами, относятся:

- использование в качестве исходных данных только двух параметров атмосферы: температуры точки росы и метеорологической дальности видимости;
- характеристики прозрачности атмосферы рассчитываются с точностью до среднесрочных значений;
- характеристики прозрачности атмосферы ориентированы на тактико-технические характеристики ТПН и режимы их функционирования;
- характеристики прозрачности атмосферы рассчитываются с учетом физико-географических условий, сезона года и времени суток;
- характеристики прозрачности атмосферы рассчитываются с учетом давления насыщенного водяного пара, как над плоской поверхностью воды, так и над льдом.

ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА МЕТОДА ПО ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Качество разработанного Метода оценивалось по точности определения коэффициента прозрачности атмосферы для ИК-излучения, полагая, что чем он точнее относительно опорного значения, тем выше качество метеорологического обеспечения полетов ЛА с ТПН.

Для проведения численных экспериментов по оцениваю точности определения коэффициента прозрачности атмосферы были сформированы следующие исходные данные:

- архивы многолетних данных метеорологических наблюдений за 2005–2020 гг. для района аэропорта Хатай (Турция);
- климатические показатели температуры точки росы и метеорологической дальности видимости для данного населенного пункта, рассчитанные с точностью до среднесрочных значений [14];
- месяцы: январь, апрель, июль, октябрь;
- сроки: 00–03, 12–15 часов;
- максимальная дальность действия ТПН (l_0) с учетом ее тактико-технических характеристик (разрешение матрицы 640×520 , фокусное расстояние объектива 50 мм, размер пиксела микроболометра 0,17 мкм), класса обнаруживаемого объекта (грузовик с линейным размером в картинной плоскости 5 м), режима наблюдения (обнаружение с заданной вероятностью обнаружения 0,95) равна ≈ 3600 м.

При оценивании точности Метода в качестве альтернативного использовался метод А. Г. Шипунова и Е. Н. Семашкина, который наиболее применим для условий проведения численного эксперимента [13]. Рассмотрим результаты экспериментов.

На рис. 2 представлен график отклонений полученных значений коэффициента прозрачности атмосферы разработанного Метода (Метод 1) и альтернативного метода А. Г. Шипунова и Е. Н. Семашкина (Метод 2) от теоретических опорных значений коэффициента прозрачности атмосферы (Эталон) для рассматриваемых районов за октябрь месяц, срок 00.00 часов, при длине волны $\lambda_i = 10$ мкм.

Для формулировки обоснованных выводов воспользуемся методом оценивания среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки расчета. Для Метода 1 «М1» рассчитаем $\overline{\sigma_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}$, $I_{\beta,n}(\overline{\sigma_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))})$, для Метода 2 «М2» рассчитаем $\overline{\sigma_{M2}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}$, $I_{\beta,n}(\overline{\sigma_{M2}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))})$. Затем сравним точность расчетов по двум методам с помощью показателя δ :

$$\delta = \frac{\overline{\sigma_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))} - \overline{\sigma_{M2}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}}{\overline{\sigma_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}} * 100\% , \quad (1)$$

- где $\overline{\tilde{\sigma}_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}$ – СКО ошибки расчета Метода 1 относительно опорного значения;
- $I_{\beta,n}(\tilde{\sigma}_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i)))$ – оценки точности и достоверности определения коэффициента прозрачности атмосферы Методом 1;
- $\overline{\tilde{\sigma}_{M2}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}$ – СКО ошибки расчета Метода 2 относительно опорного значения;
- $I_{\beta,n}(\tilde{\sigma}_{M2}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i)))$ – оценки точности и достоверности определения коэффициента прозрачности атмосферы Методом 2;
- δ – относительная ошибка расчета.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

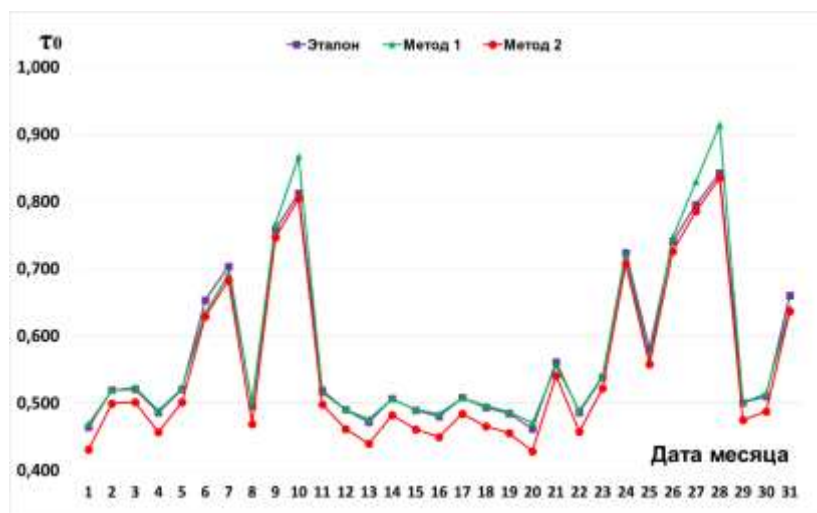


Рис. 2. Оценки τ_0 , полученные с помощью Метода 1 и Метода 2 относительно опорного значения (Эталон) за октябрь, срок 00.00 ч., $\lambda_i=10$ мкм, аэропорт Хатай (Турция)

Таблица 1

Сравнительные оценки точности и достоверности определения коэффициента прозрачности атмосферы с помощью методов «М1» и «М2», аэропорт Хатай (Турция)

Метод	Показатели качества	Месяц, срок							
		январь, 00 ч.	январь, 12 ч.	апрель, 00 ч.	апрель, 12 ч.	июль, 00 ч.	июль, 12 ч.	октябрь, 00 ч.	октябрь, 12 ч.
М1	$\overline{\tilde{\sigma}_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}$	0,047	0,041	0,044	0,034	0,031	0,034	0,077	0,057
	$I_{0,95,64}(\tilde{\sigma}_{M1}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i)))$	[0,039; 0,055]	[0,034; 0,48]	[0,037; 0,052]	[0,017; 0,039]	[0,031; 0,071]	[0,035; 0,081]	[0,031; 0,071]	[0,037; 0,084]
М2	$\overline{\tilde{\sigma}_{M2}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i))}$	0,054	0,046	0,053	0,051	0,047	0,051	0,089	0,070
	$I_{0,95,64}(\tilde{\sigma}_{M2}(\hat{\eta}_{\tau_0}(\lambda_i)))$	[0,045; 0,063]	[0,038; 0,054]	[0,044; 0,062]	[0,042; 0,060]	[0,039; 0,055]	[0,042; 0,060]	[0,074; 0,105]	[0,058; 0,081]

Из табл. 1 следует, что точность определения τ_0 М1 по отношению к М2 повысилась на 22 %.

Анализ полученных результатов, представленных на рис. 2 и в табл. 1 показал, что использование предлагаемого Метода позволяет увеличить точность определения коэффициента τ_0 в среднем на 13 %, при этом в различных регионах и климатических зонах данная

точность повышается в диапазоне от 4 до 22 %. Этого удалось достичь за счет использования статистической модели определения коэффициента поглощения водяным паром инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый метод оценивания характеристик прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения в дальнем ИК-диапазоне в районах, не освещенных данными метеорологических наблюдений, для ЛА, оснащенного ТПН. Изложены исходные данные, допущения и ограничения, необходимые для применения Метода, а также его схема и описание.

Представлены результаты оценивания качества Метода по точности определения коэффициента прозрачности атмосферы. В результате численных экспериментов стало очевидным, что точность определения коэффициента прозрачности атмосферы улучшилась в среднем на 13%.

Список используемых источников

1. Об утверждении Федеральных авиационных правил производства полетов БЛА государственной авиации: приказ Министра обороны РФ. – URL: <http://internet.garant.ru> (дата обращения: 23.10.2020).
2. *Мирошников М. М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1977. – 600 с.
3. *Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
4. *Тымкул Л. В., Тымкул В. М.* Системы инфракрасной техники: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 164 с.
5. *Новиков С. Н., Поликанин А. Н.* Методика расчета дальности действия ТБСА на основе объединенных параметров температурной чувствительности и разрешения // Труды учебных заведений связи. – 2019. – Т. 5, № 4. – С. 6–14.
6. *Семенов В. В., Алёхин С. Г., Готюр И. А.* Метод расчета коэффициента прозрачности атмосферы для тепловизионных систем в спектральном диапазоне 8–12 мкм // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 117–128.
7. *Семенов В. В.* Модель прозрачности атмосферы для оптико-электронных систем «смотрящего» типа в спектральном диапазоне 8–12 мкм // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 256–262.
8. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
9. *Хадсон Р.* Инфракрасные системы / пер. с англ. Я. Б. Герчикова, Ю. Е. Голубчина, С. Г. Кина; под ред. Н. В. Васильченко. – М.: Мир, 1972. – 536 с.
10. *Тимофеев Ю. М., Васильев А. В.* Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
11. Справочник по инфракрасной технике: в 4 т. : пер. с англ. / ред. У. Вольф, Г. Цисис. – М.: Мир, 1995. – Т. 1: Физика ИК-излучения. – 606 с.
12. *Шипунов А. Г., Семашкин Е. Н.* Дальность действия, всесуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. – М.: Машиностроение, 2011. – 218 с.
13. *Шипунов А. Г., Семашкин Е. Н.* Всепогодность радиолокационных и тепловизионных каналов наведения комплексов ПВО. – М.: Машиностроение, 2013. – 280 с.
14. Климатология: учебник / О. А. Дроздов [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 567 с.

И. Н. Ростокин*,

доктор технических наук, доцент;

Е. А. Ростокина*,

кандидат технических наук, доцент;

Е. В. Федосеева*,

доктор технических наук, доцент;

Г. Г. Щукин***

доктор физико-математических наук, профессор

*Муромский институт (филиал)

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет
имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром.

**ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ МНОГОЧАСТОТНЫХ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ВВЕДЕНИИ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

В статье проанализированы перспективы модернизации многочастотных СВЧ радиометрических систем дистанционного зондирования атмосферы. Проведен анализ вариантов применения устройств радиофотоники для совершенствования многочастотных СВЧ систем дистанционного зондирования. Предложен вариант четырехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с оптическим каналом передачи информации. Рассмотрены известные варианты радиофотонных узлов, входящих в состав оптического канала передачи информации многочастотной СВЧ радиометрической системы.

Ключевые слова: многочастотные СВЧ радиометрические системы, дистанционное зондирование атмосферы, оптический канал передачи информации, радиофотоника.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы совершенствования современных СВЧ радиометрических систем дистанционного зондирования связаны с решением задач повышения чувствительности измерений за счет снижения потерь передачи информации и уменьшения собственных шумов системы, а также расширения функциональных возможностей и усовершенствования конструктивных вариантов исполнения каналов передачи данных измерений.

Одно из современных направлений совершенствования радиотехнических систем – включение в их состав устройств радиофотоники, в которых реализуются новые научные и технологические подходы в соединении СВЧ-радиоэлектроники и фотоники на основе использования взаимодействия оптического излучения и СВЧ сигналов в процессе формирования входного сигнала, его передачи и обработки полученной информации. Преимущества радиофотонных технологий – малые оптические потери, стойкость к электромагнитным помехам и частотная полоса более 100 ГГц – определяют перспективность их применения для совершенствования радиоизмерительных систем, в том числе СВЧ систем дистанционного зондирования [1, 2].

Так, замена полупроводниковых компонентов на радиофотонные дает возможность существенно упростить схемотехнические решения и функциональное построение аппаратуры, сократить ее массу, габариты и потребляемую для работы системы мощность.

В данной статье анализируются перспективы и возможности совершенствования многочастотной СВЧ радиометрической системы наземного дистанционного зондирования атмосферы.

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ВКЛЮЧЕНИЯ УСТРОЙСТВ РАДИОФОТОНИКИ В СОСТАВ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Для определения направления совершенствования многодиапазонной СВЧ системы дистанционного радиометрического исследования атмосферы путем включения в ее состав устройств радиофотоники были проанализированы варианты решения данной задачи в работах по совершенствованию систем дистанционного зондирования [3–5].

В работе [3] для перспективной системы дистанционного зондирования предложено включение в ее состав следующих элементов радиофотоники: фазированной антенной решетки, оптического передающего блока, оптического цифрового приемного блока и волоконных линий связи; выполнен выбор серийно выпускаемых радиофотонных элементов и узлов. Исходя из данных по параметрам радиофотонных модулей, проведен анализ изменения основных технических характеристик и параметров системы, показана возможность существенного повышения чувствительности, увеличения дальности работы и уменьшения ее массогабаритных показателей.

В работе [4] исследованы перспективы модернизации современных систем дистанционного зондирования при введении элементов радиофотоники в устройства генерации и преобразования сигналов. Так, одно из направлений модернизации – применение активных фазированных антенных решеток (АФАР), в которых выполняется многоканальная пространственная обработка сигналов на базе технологий радиофотоники. Это позволит получить лучшие характеристики систем дистанционного зондирования:

- чувствительность;
- информативность;
- дальность работы, которая повысит защищенность от внешних помех и обеспечит пониженное энергопотребление.

Решение указанной задачи модернизации основано на внедрении в состав системы источников и приемников оптического излучения, усилителей оптического сигнала, электрооптических модуляторов (ЭОМ) и демодуляторов, волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и оптических пассивных элементов.

Перспективным является направление преобразования СВЧ сигнала в оптический информационный сигнал в антеннах радиоизмерительных систем. В работе [5] описаны и проанализированы радиочастотные излучатели нового поколения на основе электромагнитных кристаллов с запрещенными зонами (ЕВГ-кристаллов). Их применение позволит улучшить характеристики антенн. Выполнение антенн на основе ЕВГ-структур приведет:

- к увеличению эффективности излучения антенн;
- к увеличению усиления и коэффициента направленности антенн;
- к улучшению параметров ДН антенн, уменьшению боковых и задних лепестков;
- к практически полному устранению паразитной взаимосвязи между излучателями в антенной решетке;
- к значительному улучшению поляризационных характеристик антенн;
- к получению более широкой полосы рабочих частот;
- к существенному уменьшению массогабаритных показателей системы;
- к возможности значительного снижения металлоемкости антенн.

Рассмотренные перспективы совершенствования систем дистанционного зондирования на основе введения в их состав узлов и блоков радиофотоники показали возможности различной степени внедрения технологий радиофотоники – от замены практически всей СВЧ части системы, включая антенну, до введения в состав системы оптического канала передачи от СВЧ части системы к устройству приема и обработки информации.

МНОГОЧАСТОТНАЯ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ С РАДИОФОТОННЫМ БЛОКОМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Многочастотное СВЧ радиометрическое наземное дистанционное исследование атмосферы позволяет в пассивном режиме приема собственного радиотеплового излучения зондируемой области выполнить оценку ее физического состояния, определить с допустимой погрешностью значения ее метеопараметров. Наличие нескольких частотных каналов расширяет как функциональные, так и информативные возможности СВЧ радиометрического зондирования.

Переход к многочастотному дистанционному зондированию определяет необходимость решения ряда технических задач в построении системы, в частности, обеспечения пространственного совмещения области зондирования, снижения воздействия фонового шума при разных значениях коэффициента рассеяния антенн на разных частотах, частотной фильтрации принятых шумовых сигналов.

Эти задачи решены в трехдиапазонной СВЧ системе радиометрического зондирования [6] с центральными частотами каналов 3,5 ГГц, 10 ГГц, 22 ГГц при выполнении измерения мощности радиотеплового излучения атмосферы с приемом на общую апертуру зеркала с последующим последовательным разделением входных сигналов разных частотных диапазонов в модовом разделителе облучателя антенны. Кроме того, для решения задачи помехозащищенности системы предусмотрена компенсация влияния фоновых шумов при организации приема дополнительного сигнала в каждом диапазоне с реализацией разностного выделения полезной составляющей входного сигнала при окончательной обработке данных измерений.

Расширение функциональных возможностей многочастотной СВЧ радиометрической системы привело к необходимости дополнительного включения еще одного канала с центральной частотой 37,5 ГГц. Значения основных технических характеристик четырехдиапазонной СВЧ системы радиометрического исследования атмосферы приведены в табл. 1. Характеристики приведены для двух вариантов антенных систем, применяемых в мобильной и стационарной СВЧ версии радиометрических систем дистанционного исследования атмосферы, с диаметром раскрыва общей апертуры зеркала 1000 мм и 2400 мм соответственно.

Таблица 1

Основные технические характеристики четырехдиапазонной СВЧ системы радиометрического исследования атмосферы

Параметр	Значение			
	3,5	10	22	37,5
Центральная частота диапазона f , ГГц	3,5	10	22	37,5
Чувствительность ΔT при постоянном времени накопления выходного сигнала $\tau = 1$ с	0,03	0,04	0,05	0,07
Полоса пропускания Δf , МГц	800	1000	800	800
Шумовая температура приемника $T_{ш\text{пр}}$, °К	13	13	101	438
Коэффициент усиления приемника G , дБ	60	60	53	50
Ширина ДН антенны при $D = 1000$ мм, $F = 320$ мм – мобильный вариант	5,07	1,82	0,91	0,5
Коэффициент усиления антенны $K_{ус}$, дБ	31	40	46	50
Ширина ДН антенны, при $D = 2400$ мм, $F = 900$ мм – стационарный вариант	2,13	0,76	0,38	0,2
Коэффициент усиления антенны $K_{ус}$, дБ	39	48	54	60

Предложенный вариант с четырьмя частотными диапазонами с приемным блоком по каждому диапазону предполагает наличие линий передачи данных с четырех входных каналов и линий подачи питающих напряжений, выполненных изначально в виде отдельных коаксиальных кабелей. Данный вариант имеет значительные массогабаритные характеристики, необходимость решения задачи построения соответствующего опорно-поворотного устройства при выполнении сканирования атмосферы. Поэтому на первом этапе модернизации многочастотной СВЧ радиометрической системы было предложено ввести канал передачи информации от СВЧ блоков системы к устройству приема и обработки информации на основе оптоволоконной линии, что предполагает введение в состав узлов радиофотоники.

Структурная схема четырехдиапазонной СВЧ системы радиометрического исследования атмосферы, с оптическим каналом передачи информации представлена на рис. 1.

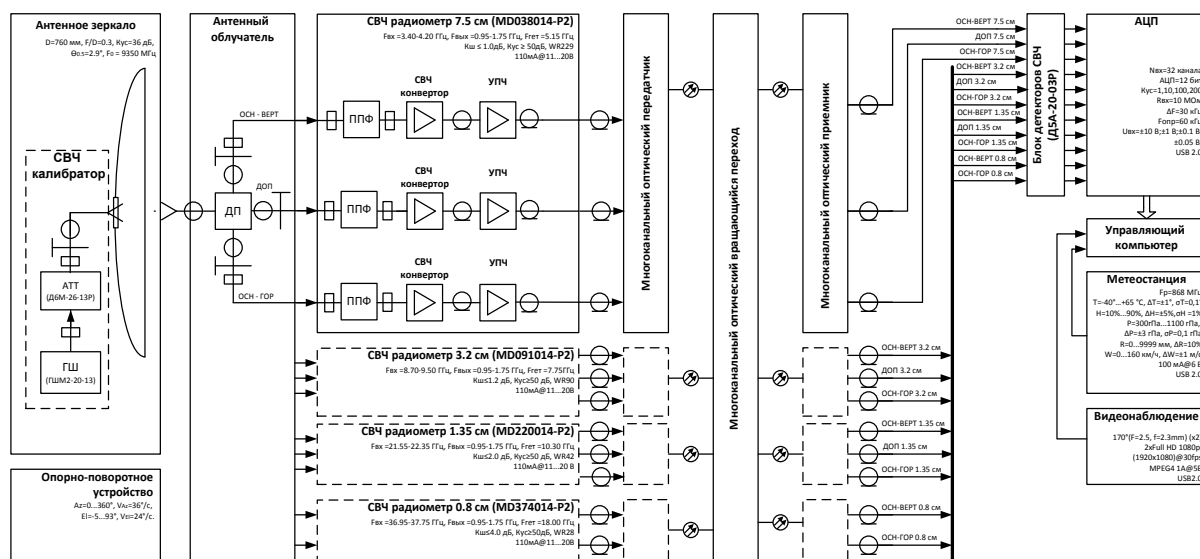


Рис. 1. Структурная схема многочастотной микроволновой радиометрической системы с оптическим каналом передачи информации

Согласно рис. 1 в составе многочастотной СВЧ радиометрической системы с оптическим каналом передачи информации используются следующие радиофотонные узлы: многоканальные оптические передатчики, приемники и вращающиеся сочленения (при реализации опорно-поворотного устройства), а также оптические кабели.

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ МНОГОДИАПАЗОННОЙ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Задача передачи информационных сигналов от СВЧ блока к устройству приема и обработки в условиях сканирования атмосферы определяет необходимость в многоканальном оптическом вращающемся переходе. Аналогичная задача решена в работе [7], в которой предложен вариант передачи информации для окончательной обработки по волоконно-оптической линии после преобразования сигнала в цифровой код, что дает ряд преимуществ перед вариантом использования для этих целей коаксиальных или волноводных линий.

Реализация многоканального оптического вращающегося перехода возможна на основе оптического вращающегося сочленения. На рис. 2 представлен вариант 12-канального оптического перехода, который имеет следующие габаритные размеры: 106,5 мм в длину и 38 мм наружный диаметр в ширину.

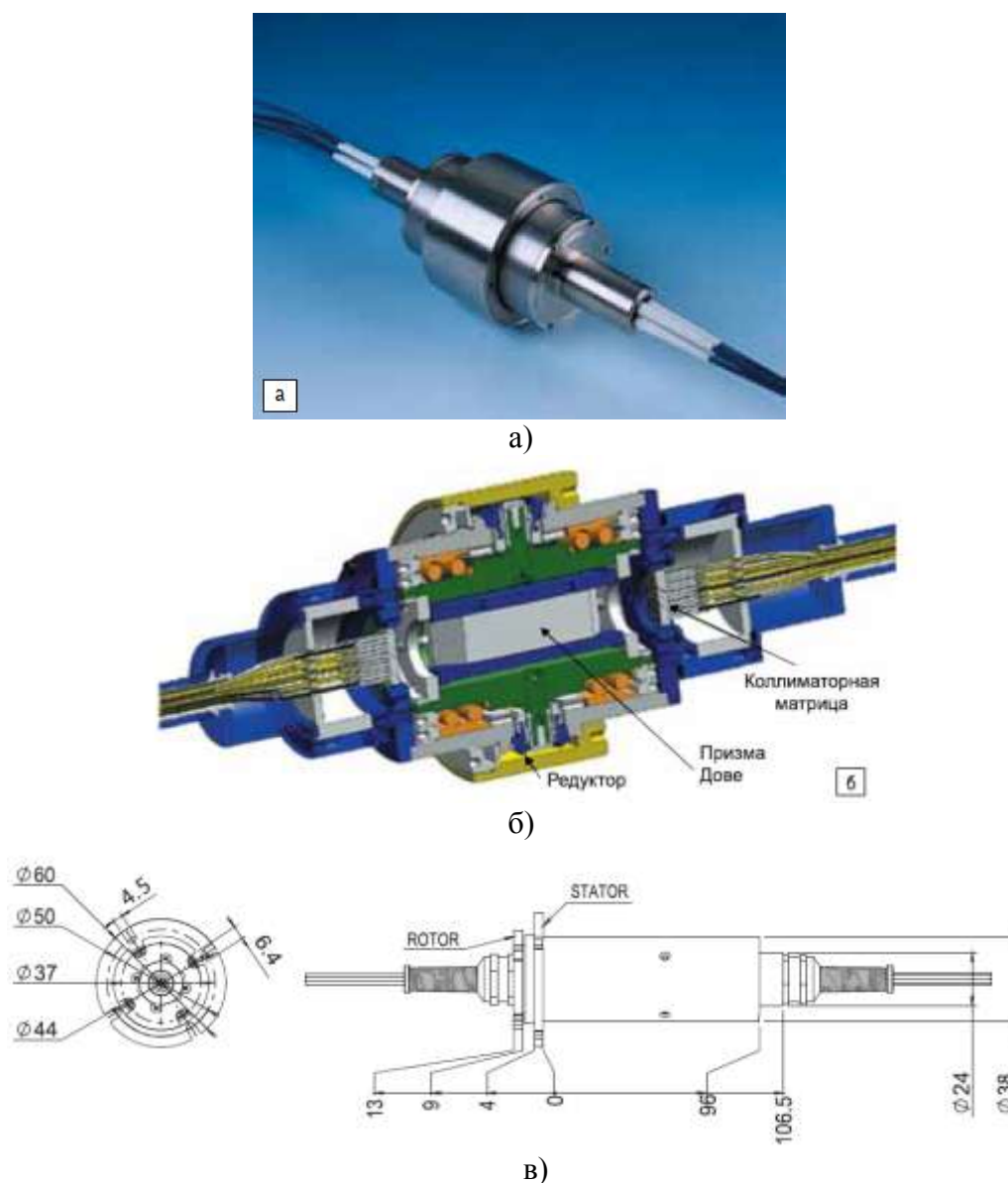


Рис. 2. Многоканальное вращающееся оптическое сочленение:
 а – внешний вид; б – конструкция; в – размеры

Оптический канал передачи информации в многочастотной СВЧ радиометрической системе предполагает необходимость в многоканальных оптических передающих и приемных устройствах.

В оптических передатчиках выполняется преобразование сигналов промежуточной частоты (1 ГГц) в сигнал оптического диапазона (1310 нм или 1550 нм), причем для различных диапазонов используются отдельные лазеры. Для суммирования двух оптических несущих в одно одномодовое волокно используется WDM-диплексер. Вариант реализации многоканального оптического передатчика представлен на рис. 3 [8].

Оптические приемники серии OR4 преобразуют оптический сигнал в 4 сигнала промежуточной частоты СТВ-поддиапазона. Приемники серии OR5 преобразуют оптический сигнал в 4 сигнала промежуточной частоты СТВ-поддиапазона и DTT-диапазон, для преобразования полос СТВ и DTT используются отдельные фотодиоды и лазеры.

Вариант реализации многоканального оптического приемника представлен на рис. 4 [8].

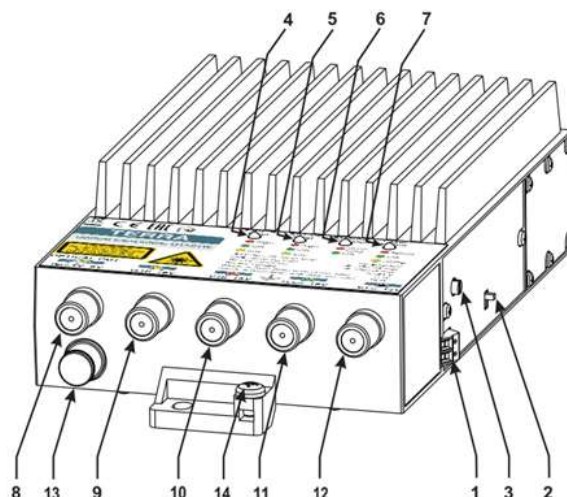


Рис. 3. Оптический передатчик:

1 – вход по напряжению питания $+12 \div +24$ В; 2 – переключатель для питания предусилителя; 3 – переключатель выбора требуемого количества наземных транспондеров; 4 – светодиодный индикатор входного уровня СВЧ мощности (красный – слишком высокий, зеленый – корректно (диапазон АРУ), желтый – слишком низкий); 5 – светодиодный индикатор для СВЧ входного уровня (красный – слишком высокий, зеленый – корректно (диапазон АРУ), желтый – слишком низкий); 6 – светодиодный индикатор состояния питания конвертера и наземного предусилителя; 7 – светодиодный индикатор состояния лазера; 8 – радиочастотный вход сигнала DTT; 9 – СВЧ-вход промежуточной частоты (полярность H, Hi, DC-выход $+18$ В); 10 – СВЧ-вход промежуточной частоты, полярность (V, Vi, DC-выход $+13$ В); 11 – СВЧ-вход промежуточной частоты (полярность H, Lo, DC-выход $+18$ В); 12 – СВЧ-вход промежуточной частоты (полярность V, Lo, DC-выход $+13$ В); 13 – оптический выход; 14 – клемма заземления

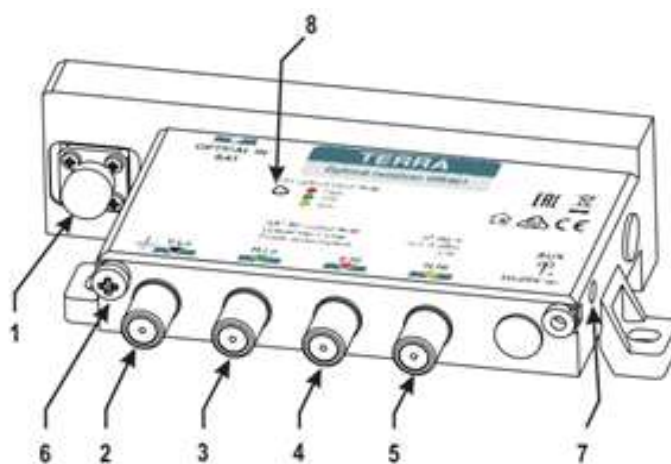


Рис. 4. Оптический приемник:

1 – оптический вход, разъем типа FC/APC; 2–5 – СВЧ-выходы промежуточной частоты, разъемы типа F (2 – V, Lo Res.1; 3 – H, Lo Res.2; 4 – V, Hi Res.3; 5 – H, Hi Res.4); 6 – клемма заземления; 7 – вход для напряжения питания $+10 \div +20$ В; 8 – светодиодный индикатор оптической входной мощности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования перспектив модернизации многочастотных СВЧ радиометрических систем дистанционного зондирования атмосферы показали возможность на первом этапе введения оптического канала передачи информации от многоканального СВЧ блока к устройству приема и обработки информации на основе введения радиофотонных узлов и блоков. Это существенно улучшит как массогабаритные характеристики системы, так и, в конечном счете, параметры системы – чувствительность, помехозащищенность. Введение оптического канала передачи информации позволит в дальнейшем дополнительно включать в состав системы разрабатываемые радиофотонные устройства, например оптические АЦП с функцией преобразования, накопления и обработки сигналов для решения задач оценки метеопараметров атмосферы и формирования развития метеообстановки в реальном режиме времени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00378 (<https://rscf.ru/project/21-19-00378/>).

Список используемых источников

1. Possibility and application of all-weather lidar-radio sensing complexes. International Conference «Actual Trends in Radiophysics» / A. S. Boreysho [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – № 1499. – 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012025.
2. Перспективы оптико-радиочастотных систем дистанционного зондирования атмосферы / А. С. Борейшо [и др.] // Фотоника. – 2021. – Т. 15, № 1. – С. 76–84. – DOI: 10.22184/1993-7296.
3. Ростокин И. Н., Каряев В. В., Ростокина Е. А. Особенности построения радиофотонных радиолокаторов // Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2019: материалы XVII Международной научно-технической конференции. Казань, 18–22 нояб. 2019 г. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2019. – Т. 2. – С. 77–79.
4. Design features of microwave photonic radars / I. N. Rostokin [et al.] // Proc. SPIE 11516, Optical Technologies for Telecommunications 2019. – 2020. – Vol. 11516. – 115160L-1-6. – DOI: 10.1117/12.2566327.
5. Исследование вариантов построения антенных устройств радиофотонных РЛС / И. Н. Ростокин [и др.] // Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2020: материалы XVIII Международной научно-технической конференции. Самара, 17–20 нояб. 2020 г. – Самара: ПГУТИ, 2020. – С. 77–78.
6. Ростокин И. Н., Федосеева Е. В., Федосеев А. А. Вопросы построения многочастотной СВЧ – радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – № 1. – С. 5–11.
7. Octave Spanning Tunable Frequency Comb from a Microresonator / P. Del'Haye [et al.] // Physical Review Letters. – 2011. – Vol. 107. – P. 81–87.
8. Оптоволоконное оборудование. – URL: www.terraelectronics.com (дата обращения: 16.01.2022).

В. Н. Шулейкин*,
доктор физико-математических наук;
Г.Г. Щукин******,
доктор физико-математических наук, профессор
*ИПНГ РАН, г. Москва.
**ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.
*** Муромский институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет
имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Муром.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Объемный заряд приземного воздуха обязан своим происхождением ионизации экскалирующим почвенным радоном, перенос которого в атмосферу осуществляют два летучих газа-носителя – водород и метан. Наличие геологических неоднородностей или зон геодинамических процессов с повышенным сбросом в атмосферу газов-носителей и близким подходом к поверхности глин, содержание материнского вещества в которых всего в два раза меньше, чем в гранитах, характеризуются избыточным сбросом в атмосферу почвенного радона – реверсивным электродным эффектом. Зоны сжатия или образования депрессионных воронок характеризуются классическим электродным эффектом. Эти закономерности можно успешно использовать для бесконтактного контроля с поверхности земли геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов.

Ключевые слова: объемный заряд, ионизация, радон, водород, метан, электродный эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес геофизиков к электрическим характеристикам приземного воздуха возник после регистрации биполярных аномальных вариаций атмосферного электрического поля (АЭП) до, во время и после землетрясений [1–5]. Ионизация воздуха экскалирующим почвенным радоном над отрицательно заряженной поверхностью земли привела к решению задачи электродного эффекта. При малой скорости ионизации до $7\text{--}9\text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ (малой концентрации экскаляции почвенного радона), наблюдается классический электродный эффект, при котором отрицательный заряд поверхности земли не влияет на высотное перераспределение положительных и отрицательных ионов; имеет место плавный спад поля с высотой от земли и последующий выход на фоновый уровень. Большая скорость ионизации приводит к реверсивному электродному эффекту, образованию слоя отрицательного объемного заряда, где АЭП падает до уровня ниже фонового (зачастую до отрицательных значений), и только после перегиба выходит на фон [6, 7]. Применительно к предвестниковым аномальным вариациям поля это значит, что в зоне сжатия – дефиците ионизатора будет иметь место классический электродный эффект, в зоне растяжения – реверсивный. Полученный вывод был сделан после анализа результатов многочисленных полевых измерений и уверенно указывал на связь элементов приземного атмосферного электричества с землей.

Высокий молекулярный вес радона Rn^{222} исключает возможность его самопроизвольной субвертикальной миграции. Материалы профильных наблюдений элементов приземного атмосферного электричества в комплексе с радоном и летучими газами почвенного воздуха позволили установить связи перечисленных параметров. Пузырьковые образования водорода и метана захватывают почвенный радон с глубины до 6–7 м и выносят его в приповерхностную атмосферу [8]. Концентрация радона атмосферы минимум в 100 раз меньше его содержания в грунте [9, 10]. Если изменить содержание радона грунта на 1 %, это практически не скажется на его концентрации в грунте. Однако в приповерхностной атмосфере это в два ра-

за изменит плотность объемного заряда. Другими словами эксхалация ионизатора будет крайне чувствительна к изменениям плотности субвертикальных потоков газов-носителей – водорода и метана. Рассмотрим практические возможности использования элементов приземного атмосферного электричества при решении задач прикладной геофизики.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ И ЭЛЕКТРОДНЫЙ ЭФФЕКТ

Возможность использования элементов приземного атмосферного электричества для бесконтактного картирования геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов открывается за счет изменения скорости ионизации приземного воздуха над объектом исследования и электродного эффекта. Самый общий анализ профильных вариаций атмосферного электрического поля (АЭП) и полярных проводимостей (ПП) воздуха показывает, что практически над всеми геологическими неоднородностями наблюдается реверсивный электродный эффект [6, 7]. Классический электродный эффект удалось зарегистрировать лишь в упомянутом выше случае сжатия поверхности земли перед землетрясением и над зоной промышленного забора артезианских вод, где создается депрессионная воронка, минимизирующая воздухообмен почва – атмосфера, т. е. вынос ионизатора в приповерхностный воздух.

Задача электродного эффекта решалась с середины прошлого века. Сначала для простейшего случая присутствия в атмосфере только легких ионов. На следующем этапе решение задачи электродного эффекта было получено методом Рунге-Кутты четвертого порядка для сравнимых концентраций легких и тяжелых ионов. На сегодняшний день эта задача решена для конвективно-турбулентного приземного слоя с учетом многократно заряженных частиц (рис. 1) [6, 7]. Кривые 1–3 описывают распределение плотности заряда легких и тяжелых ионов в зоне классического электродного эффекта.

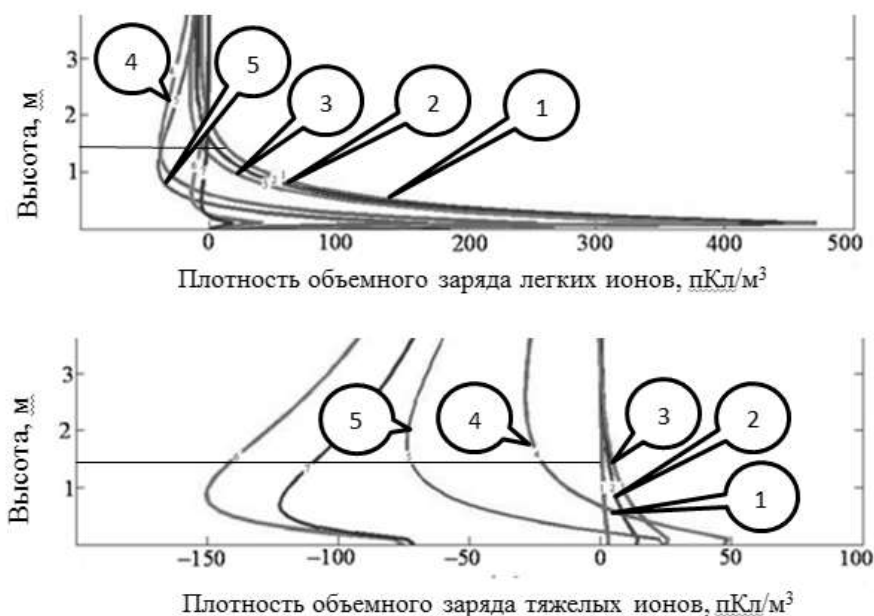


Рис. 1. Плотность объемного заряда легких и тяжелых ионов при скорости ионизации $80 \text{ см}^3/\text{с}$ и плотностях нейтральных ядер конденсации $N_1 \sim 10^8 \text{ м}^{-3}$, $N_2 \sim 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, $N_3 \sim 10^9 \text{ м}^{-3}$, $N_4 \sim 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $N_5 \sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $N_6 \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $N_7 \sim 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Плотности нейтральных ядер конденсации N_6 и N_7 в реальной атмосфере при отсутствии осадков и туманов не наблюдаются и не рассматриваются

При малой скорости ионизации и плотности нейтральных ядер конденсации $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ концентрация легких ионов практически на порядок меньше. Этой разницей АЭП обязано исключительно заряду тяжелых ионов [11–13].

При увеличении скорости ионизации на порядок и дефиците нейтральных ядер конденсации (кривые 1–3 на рис. 1) ситуация меняется с точностью до наоборот. До высоты 1,5 м для классического электродного эффекта (кривые 1–3) объемный заряд воздуха определяется зарядом легких ионов. Причин тому две – высокая скорость ионизации, порождающая высокую плотность легких ионов, и дефицит плотности нейтральных ядер конденсации. Переход от классического электродного эффекта (положительные значения АЭП) к реверсивному (кривые 3 и 4) очень резок. Условие перехода – увеличение плотности отрицательного заряда тяжелых ионов с $N_3 \sim 10^9 \text{ м}^{-3}$ до $N_4 \sim 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$. В частности, из рис. 1 следует, что на высоте 1,5 м плотность легких ионов $n(1,5)_4 \sim n(1,5)_5 \sim -40 \text{ пКл/м}^3$, тяжелых $N(1,5)_4 \sim -23 \text{ пКл/м}^3$, $N(1,5)_5 \sim -70 \text{ пКл/м}^3$. Высокая скорость ионизации и дефицит нейтральных ядер конденсации приводит к тому, что в отличие от классического электродного эффекта здесь объемный заряд приземного воздуха задается сравнимыми величинами легких и тяжелых ионов.

Физическая причина подобного изменения плотности заряда тяжелых ионов – увеличение плотности нейтральных ядер конденсации. В реальной атмосфере подобные изменения произойдут при росте относительной влажности воздуха [14, 15]. Проведенный анализ позволяет утверждать, что для достоверного использования элементов приземного атмосферного электричества необходим жесткий контроль относительной влажности воздуха.

АЭП НАД РУДОПРОЯВЛЕНИЕМ И ПОДЗЕМНЫМИ ХРАНИЛИЩАМИ ГАЗА

Самый общий подход к оценке влияния газового состава приповерхностных слоев грунта на электрические характеристики приземного воздуха позволят утверждать, что в слое глубиной до 6–7 м относительно поверхности земли должны присутствовать природные радионуклиды. Их концентрация зависит от радиоактивности почвообразующих горных пород, от процессов выщелачивания почв грунтовыми водами, сорбции радионуклидов почвами и осаждения их из почвенных вод [16–18].

За ионизацию приземного атмосферного воздуха несут ответственность три радиоактивных газа: радон Rn с периодом полураспада $\tau_{Rn} = 3,82$ дня, торон Tn – $\tau_{Tn} = 54,5$ с и актинон Ac – $\tau_{Ac} = 3,92$ с, которые являются дочерними продуктами распада радия, тория и актиния. С учетом периодов полураспада основным ионизатором будет являться радон.

За десятилетия полевых работ были отобраны тысячи проб почвенного и атмосферного воздуха датчиком типа РГА-01 для определения объемной активности радиогенных газов. Практически во всех случаях объемная активность торона была на 2 порядка меньше объемной активности радона. Только на одном профиле длиной 600 м (13 наблюдательных пикетов) объемные активности радона и торона оказались сравнимы между собой – средние значения $Rn = 9,8 \text{ Бк/л}$, $Tn = 7,5 \text{ Бк/л}$, $Rn(a) = 1,7 \text{ Бк/л}$, $Tn(a) = 0,9 \text{ Бк/л}$. По данным бурения исследуемая площадь находилась в зоне дробления горных пород. Зарегистрированный пример выбран случайно и определяется геологическими особенностями исследуемой территории.

Выше отмечалась высокая чувствительность эксхалирующего почвенного радона к плотности субвертикальных потоков газов-носителей. Рассмотрим результаты экспериментальных измерений, иллюстрирующих это утверждение (рис. 2). Основной ингредиент шлейфа нефтяного месторождения – метан. Полевые исследования показали, что внутри контура проекции нефтяной залежи на поверхность земли концентрация метана грунта растет. Для лабораторного анализа отбирались образцы почвенного воздуха [19].

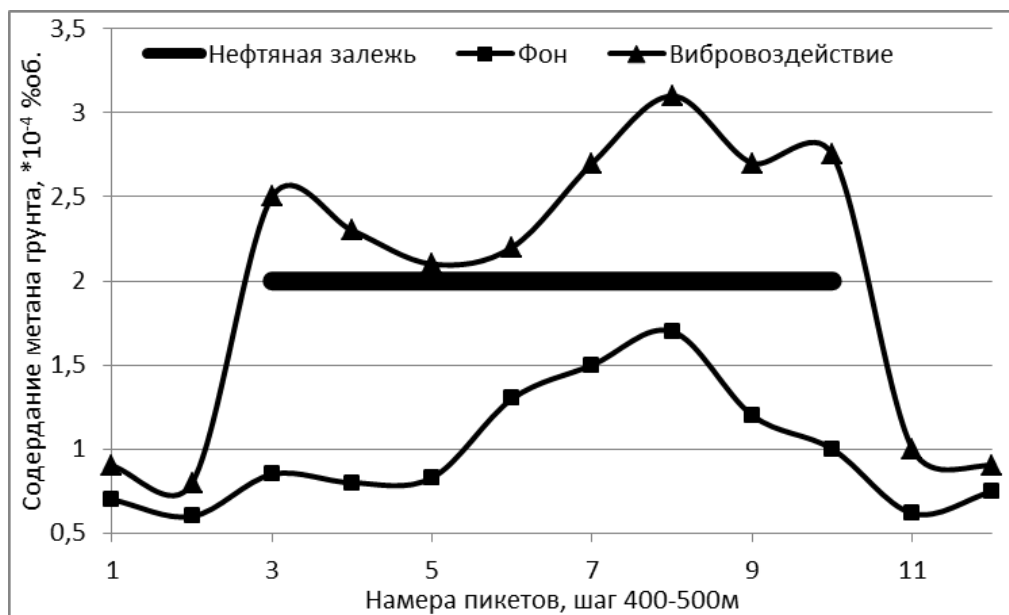


Рис. 2. Содержание метана грунта на профиле, секущем нефтяную залежь до и после вибровоздействия

Эксперимент повторялся с одновременным вибровоздействием на залежь сейсморазведочным вибратором в диапазоне частот промышленных микросейсм 5–25 Гц. В среднем уровень метана составляет: за пределами залежи – $\text{CH}_4 \sim 6,6 \cdot 10^{-5}$ об.%; при вибровоздействии – $\text{CH}_4 \sim 9,0 \cdot 10^{-5}$ об.%; над залежью – $\text{CH}_4 \sim 1,15 \cdot 10^{-4}$ об.%; над залежью при вибровоздействии – $\text{CH}_4 \sim 2,55 \cdot 10^{-4}$ об.%.

По данным профильных измерений АЭП на 3-м Речицком нефтепромысле (Белоруссия) около пущенной в эксплуатацию скважины отношение средних значений поля над контуром залежи и за ее пределами составило 1,8. Через 3 года эксплуатации из-за снижения внутрипластового давления и заводнения это отношение упало до 1,15 [8].

В ходе нивелировок на Краснопартизанском ПХГ (Украина) в период закачки были зарегистрированы вертикальные движения амплитудой до 2 см. Это значит, что по контуру пласта-коллектора имело место растяжение грунта [20]. В подземных газохранилищах в искусственно выбранных пластах-коллекторах из-за некачественных покрышек, не предусмотренных природой, за годы эксплуатации происходит накопление метана в приповерхностных слоях грунта. В результате при очередной закачке из-за растяжения порового пространства имеет место сброс накопленного горючего газа в атмосферу, что приводит к росту эксхалляции радона и к спаду АЭП. Этот эффект использовался при оконтуривании объема закачки на старейшем Щелковском газохранилище. В 1999 г. спад поля относительно фона за пределами газохранилища составил величину $\Delta E = 293$ В/м; в 2000 г. – $\Delta E = 231$ В/м. Более того, на одном из профилей, проходящем через куст нагнетательных скважин был неоднократно зарегистрирован спад АЭП с переполюсовкой – ярко выраженный реверсивный электродный эффект. Через 4 месяца в этом месте произошел аварийный прорыв газа.

Над контуром Касимовского газохранилища спад АЭП менее контрастен, но явно превышает ошибки измерительной аппаратуры. Средние значения поля по отрезкам трех профилей над объемом закачки составляют 138 В/м, 136 В/м и 140 В/м. Значения поля за пределами проекции зоны объема закачки на поверхность – 184–240 В/м.

Естественно, что наиболее контрастные изменения поля следует ожидать в период закачки. Для иллюстрации на рис. 3 представлены вариации АЭП на профиле, пересекающем линию растекания закачиваемого метана от куста нагнетательных скважин к купольной части газохранилища.

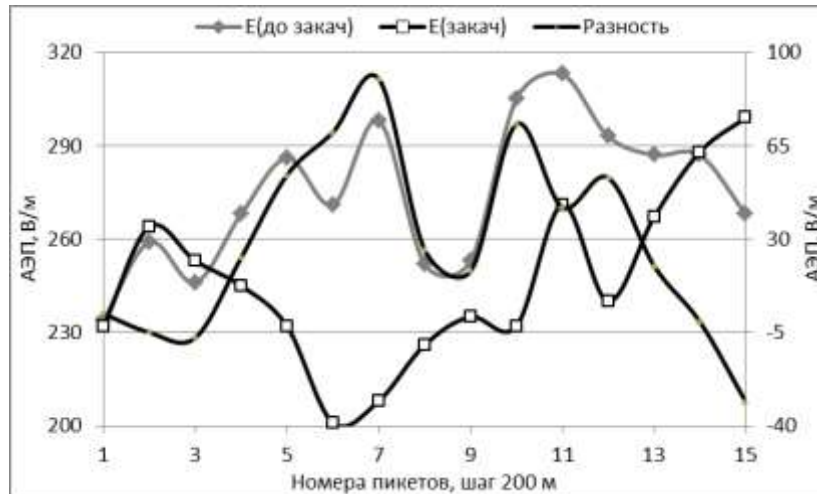


Рис. 3. Вариации АЭП на профиле, пересекающем линию растекания метана от куста нагнетательных скважин к купольной части газохранилища

После завершения процесса закачки метан продолжает перетекать от куста нагнетательных скважин к купольной части ПХГ. Контроль релаксации пониженных значений АЭП к исходным величинам позволяет оценить скорость течения горючего газа. Так, через 6 дней после завершения цикла закачки на 4-й очереди Касимовского газохранилища пониженные значения поля сохранялись только у двух скважин ($E_2 \sim 304$ В/м), тогда как на остальных 17 скважинах оно возросло до величины $E_{17} \sim 451,5 \pm 11,2$ В/м; средняя скорость растекания метана составила $\sim 38\text{--}42$ м/сут.

Первые результаты по АЭП мониторингу геологических неоднородностей были получены в 1986–1987 гг. на Новоселковском рудопроявлении, где в ходе электрохимических процессов в шапке рудного тела выделялся водород – газ-носитель радона в приземную атмосферу, что и приводило к спаду поля в контуре проекции рудного тела. В частности по результатам наблюдений на Новоселковском ильменит-магнетитовом рудопроявлении (Белоруссия) над зоной рудного тела среднее значение поля $E = (221 \pm 18)$ В/м; над зоной вне рудного тела среднее значение поля $E = (309 \pm 37)$ В/м [8].

Измерения проводились с использованием двух флюксометров «Поле-2», прошедших предварительную проверку на идентичность. Один из приборов использовался при производстве профильных измерений, второй, установленный в непосредственной близости от объекта исследований, отслеживал стабильность контролируемого параметра в период проведения профильных наблюдений. Суммарная ошибка двух флюксометров и разброс АЭП в период профильных измерений составили 13 %; относительный спад поля над рудным телом $\sim 30\%$, что явно превышает ошибки наблюдений.

МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ, ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, АЭП И ПП

Из рис. 2 следует, что сейсмическое воздействие неизбежно приводит к интенсификации сброса метана в приповерхностную атмосферу. Рассмотрим материалы экспериментальных измерений, показывающие влияние этих процессов на элементы приземного атмосферного электричества.

На сейсмических станциях Пулково, Москва, Иркутск стоят сейсмоприемники, позволяющие регистрировать штормовые микросейсмы Северной Атлантики периодов $T \sim 4\div 9$ с. В сейсмоспокойный период амплитуда этих колебаний лежит на уровне десятых долей микрона.

Во время микросейсмических бурь в Северной Атлантике амплитуды сейсмического сигнала периодов $T = 4 \div 9$ с увеличиваются на порядок и достигают единиц микрон. В эти периоды зарегистрированные на сейсмостанции Пулково колебания A коррелируют с вариациями АЭП E , измеряемыми в обсерватории ГГО имени А. И. Воейкого. Коэффициенты корреляции между рассматриваемыми параметрами во временные интервалы микросейсмических бурь составляют: $k[E, E(A)]_{05-09.02} = (-0,7)$ и $k[E, E(A)]_{27.02-03.03} = (-0,84)$ (рис. 4).

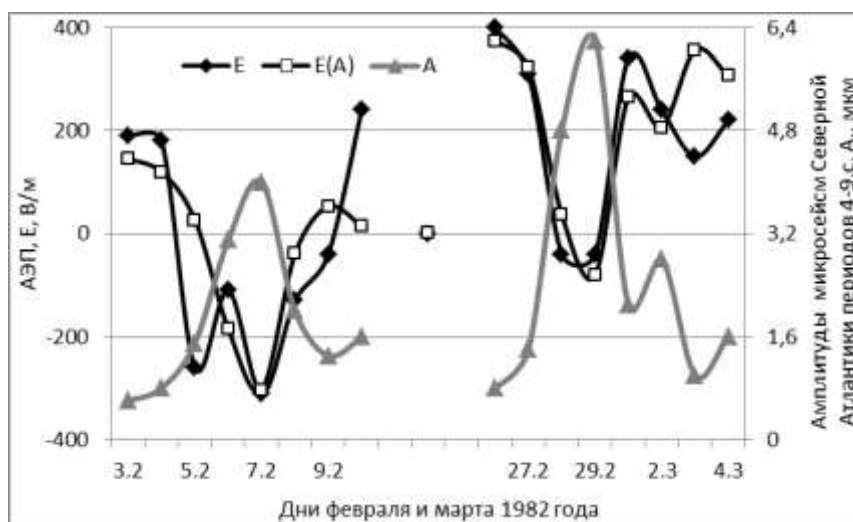


Рис. 4. Измеренные (E) и расчетные ($E(A)$) вариации АЭП и амплитуды глобальных океанических микросейсм (A) в периоды микросейсмических бурь в Северной Атлантике

Перейдем, как в примере на рис. 2, к рассмотрению влияния техногенных микросейсм в частотном диапазоне $\Delta f \sim 5 \div 25$ Гц на воздухообмен почва – атмосфера. Поскольку измерения проводились в городских условиях, где постройки, посадки, линии электропередач экранируют АЭП, регистрировались полярные проводимости и ПП приземного воздуха. Естественно, что над искусственными разуплотнениями грунта – линиями метрополитена – имеет место рост контролируемого параметра. Так над линией метро мелкого заложения увеличение ПП относительно фона достигает 6,1 раза; над линией метро глубокого заложения – 1,7. Для последнего случая, переходя к конкретным цифрам, имеем уровень суммарной полярной проводимости $\lambda \sim 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$; при прохождении поезда метро сигнал увеличивается на величину $\Delta \lambda \sim 5 * 10^{-15} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

Аналогичное явление наблюдалось в спаде АЭП при удалении от источника колебаний маневровых железнодорожных путей, на которых шло непрерывное формирование железнодорожных составов. Микроколебания ощущались в стоящей машине у железной дороги. При удалении от источника колебаний на 0,5 км поле возрастало на величину порядка $\Delta E \sim 250$ В/м, хотя измерения проводились в декабре месяце при температуре воздуха примерно -10°C , когда воздухообмен почва – атмосфера был явно затруднен из-за промерзания.

В ходе комплексных наблюдений акустических шумов в диапазоне 1–10 кГц и АЭП Камчатские исследователи зафиксировали спад поля со сменой знака после увеличения уровня шумов на порядки (рис. 5) [21]. В рамках радоновой модели генерации объемного заряда приземной атмосферы зарегистрированный спад АЭП разумно объясняется увеличением эксхалляции почвенного радона в атмосферу, следствием чего явился реверсивный электродный эффект. Минимальные значения поля достигаются через 30 минут после начала роста сейсмоакустических шумов – где-то на середине времени жизни тяжелых ионов.

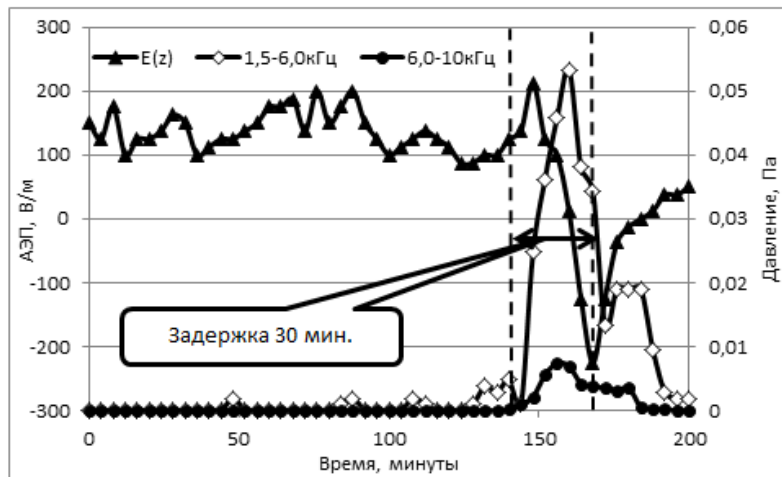


Рис. 5. Спад АЭП в результате резкого увеличения сейсмоакустических шумов диапазонов 1,5–6,0 кГц и 6,0–10,0 кГц [21]

Анализ результатов описанных экспериментов позволяет утверждать, что сейсмические колебания земли в диапазоне от 10 кГц до десятых долей герца неизбежно приводят к интенсификации воздухообмена почва – атмосфера, т. е. к росту полярных проводимостей атмосферного воздуха и спаду атмосферного электрического поля. При этом с уменьшением частоты колебаний эффективность этого воздействия растет, достигая своего максимума при квазистатических деформациях.

И в заключении остановимся на вариациях АЭП по отношению уровню грунтовых вод и верховодки (рис. 6). Измерения проводились по профилю, пересекающему овраг, на дне которого местами стояла вода. Измерительный инструмент флюксометр «Градиент» устанавливался на саях-волокушах и протягивался по профилю. Шаг между наблюдательными пикетами составил 4 м, высоты наблюдательных пикетов относительно нижней точки профиля устанавливались нивелиром. Наблюдения проводились в ясную солнечную погоду утром $E1$ и в полдень.

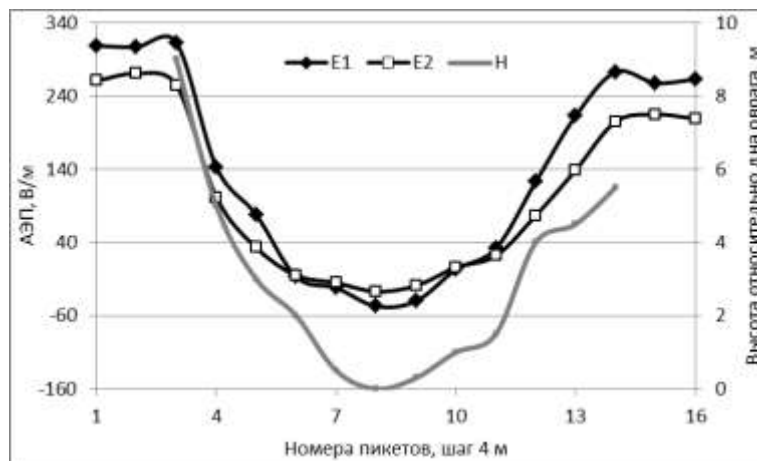


Рис. 5. Вариации АЭП на профиле, пересекающем овраг, на дне которого местами стояла вода

Как и следовало ожидать, при спуске в овраг и при приближении к урезу воды АЭП падает и даже принимает отрицательные значения, т. е. имеет место реверсивный электродный эффект. Естественно, что в утренние часы за счет более высокой влажности абсолютные значения регистрируемого поля несколько выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Профильные наблюдения АЭП всегда проводились в условиях хорошей погоды – в квазистационарных метеорологических условиях при скорости ветра не более 6 м/с, в отсутствии грозных явлений, осадков, инея, тумана, пыли, низкой облачности [11–13]. При измерениях в комплексе с ПП, радоном почвенного и атмосферного воздуха и водородом требования к скорости ветра ужесточились до 3 м/с. Более того, для текущего оперативного контроля стабильности метеоситуации в непосредственной близости от исследуемой территории устанавливался второй стационарный датчик АЭП, отслеживающий возможные временные изменения поля.

Анализ высотного перераспределения объемного заряда приземного воздуха над геологическими неоднородностями и зонами геодинамических процессов позволяет утверждать, что в большинстве случаев над ними наблюдается реверсивный электродный эффект – наличие над отрицательно заряженной поверхностью земли слоя с избыточным содержанием отрицательного заряда, вызванного повышенной скоростью ионизации. При производстве наблюдений данный эффект неизбежно приводит к спаду АЭП или росту ПП.

При скорости ионизации $7\text{--}9\text{ см}^3/\text{с}^{-1}$ объемный заряд приземного воздуха определяется зарядом тяжелых ионов. Увеличение скорости ионизации на порядок при дефиците плотности нейтральных ядер конденсации приводит к тому, что объемный заряд приземного воздуха определяется зарядом легких ионов; при плотности нейтральных ядер конденсации порядка $5 \cdot 10^9\text{ м}^{-3}$ легкие и тяжелые ионы в близких концентрациях задают плотность приземного объемного заряда.

Методика профильных измерений АЭП разрабатывалась на материалах измерений над скоплениями углеводородов, где в качестве основного газа-носителя ионизатора выступал метан. Вторым газом-носителем ионизатора в приповерхностную атмосферу является водород. С учетом современной тенденции на использование водородного топлива все разработанные и многократно успешно использованные способы наблюдений можно взять на вооружение при исследованиях каналов сброса водорода в атмосферу – циркумтентах.

Список используемых источников

1. *Milne J.* Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena // *J Trans. Seismol. Soc. Jap.* – 1890. – Vol. 15. – P. 135–164.
2. *Чернявский Е. А.* Атмосферно-электрические и электротеллурические явления при землетрясениях // *Социалистическая наука и техника.* – 1936. – № 112. – С. 26–35.
3. *Чернявский Е. А.* Атмосферно-электрические предвестники землетрясений // *Метеорология и гидрология в Узбекистане.* – Изд-во АН УзССР, 1955. – С. 317–327.
4. *Бончковский В. Ф.* Изменение градиента электрического потенциала атмосферы как один из возможных предвестников землетрясений // *Труды Геофизического института АН СССР.* – 1954. – № 25(152). – С. 192–206.
5. *Бончковский В. Ф.* Землетрясения и методы их изучения. – М.: Издательство АН СССР, 1949. – 88 с.
6. *Редин А. А.* Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Таганрог, 2011. – 19 с.
7. *Редин А. А., Куповых Г. В., Болдырев А. С.* Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2013. – Т. LVI, № 11–12. – С. 820–828.

8. Шулейкин В. Н., Шукин Г. Г., Куновых Г. В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. – СПб.: ЦОП РГГМУ, 2015. – 205 с.
9. Сисигина Т. И. Измерения эксхалиции радона с поверхности горных пород // Вопросы ядерной метеорологии. – М.: Госатомиздат, 1962. – С. 104–111.
10. Сисигина Т. И. Эксхалиция радона с поверхности нескольких типов почв Европейской части СССР и Казахстана // Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии. – М.: Атомиздат, 1965. – С. 40–48.
11. Кашлева Л. В. Атмосферное электричество. – СПб.: изд-во РГГМУ, 2008. – 115 с.
12. Тверской П. Н. Курс метеорологии. – Л.: Гидрометиздат, 1962. – 700 с.
13. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества. – Л.: ГИТТА, 1949. – 155 с.
14. Стыро Б. И. Вопросы ядерной метеорологии. – Вильнюс, 1959. – 418 с.
15. Стыро Б. И. Самоочищение атмосферы от радиоактивных загрязнений. – Л.: Гидрометиздат, 1968. – 290 с.
16. Климишин А. В. Оценка вариаций плотности потока радона при возникновении свободной тепловой конвекции в верхнем слое почвы // Уральский геофизический вестник. – 2009. – № 2.
17. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона / А. В. Климишин [и др.] // Вестник КРАУНЦ Науки о Земле. – 2010. – № 2, вып. 16. – С. 231–237.
18. Козлова И. А. Влияние метеорологических факторов на поведение Rn-222 в массиве горных пород // Геофизика-2007: материалы научно-практ. конф. – СПб., 2007. – С. 190–191.
19. О двух типах газово-геохимических эффектов в поле вибрационного источника сейсмических колебаний / С. М. Аммосов [и др.] // ДАН СССР. – 1988. – Т. 301, № 1. – С. 62–68.
20. Никонов А. И., Новаковский Б. А., Переверзев М. В. Геоинформационное эколого-геохимическое картографирование подземного хранилища газа // Геоинформатика. – 2002. – № 1. – С. 3–8.
21. О связи высокочастотной акустической эмиссии с электрическим полем в приземном слое атмосферы / А. В. Купцов [и др.] // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 5. – С. 71–76.

Ю. В. Ясюкевич,
кандидат физико-математических наук, доцент
Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск.

ПОТЕНЦИАЛ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИЕЙ ОБ ЭФФЕКТАХ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

На территории РФ за счет развития космического сегмента глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) появилась возможность получения большого набора информации об эффектах космической погоды. В статье представлено современное состояние проблемы оценки абсолютного ионосферного полного электронного содержания (ПЭС) по данным ГНСС с основным упором на одностанционное решение. Дана информация о вариациях измеряемого отношения сигнал/шум, а также о точности позиционирования ГНСС. В заключении указаны актуальные направления дальнейших работ на ближайшую перспективу.

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, полное электронное содержание, космическая погода.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют четыре глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС): ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), *Galileo* (Евросоюз), *BeiDou/Compass* (Китай). Развитие ГНСС идет по всем ключевым сегментам – космическому сегменту, наземному сегменту управления, сегменту пользователя. После 2018 г., когда спутниковая группировка *BeiDou* была дополнена ~20 спутниками, в Азиатском секторе число одновременно наблюдаемых спутников превысило 40 [1]. Основные характеристики космического сегмента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики спутниковой группировки ГНСС (апрель 2022 г.)*

Характеристика группировки	Наименование группировки			
	ГЛОНАСС	GPS	<i>Galileo</i>	<i>BeiDou</i>
Количество спутников	25	32	26	GEO – 8 IGSO – 12 MEO – 29
Количество действующих спутников	23	30	22	44
Количество орбитальных плоскостей	3	6	3	3
Номинальная высота орбиты, км	19100	20181,6	23222	21528 (MEO)
Наклонение орбиты, град	64,8	55	56	55 (MEO)

* по данным прикладного аналитического центра ГЛОНАСС (<https://www.glonass-iac.ru/>)

Помимо роста количества спутников происходит модернизация аппаратов. Так, GPS запустил и успешно эксплуатирует спутник GPS III [2], ГЛОНАСС проводит испытания спутников ГЛОНАСС-К/ГЛОНАСС-К2, *Galileo* заключила контракт на разработку спутников нового поколения G2G (*Galileo Second Generation*). Модернизированные спутники излучают новые сигнальные компоненты и имеют лучшие характеристики сигналов [3].

Одновременно с космическим сегментом происходит увеличение числа постоянно действующих станций ГНСС, данные которых находятся в свободном доступе. На рис. 1 продемонстрировано их распределение по миру [без учета коммерческих сетей и созданной сети Федерального центра навигационных данных (<https://fcnd.ru/>)].

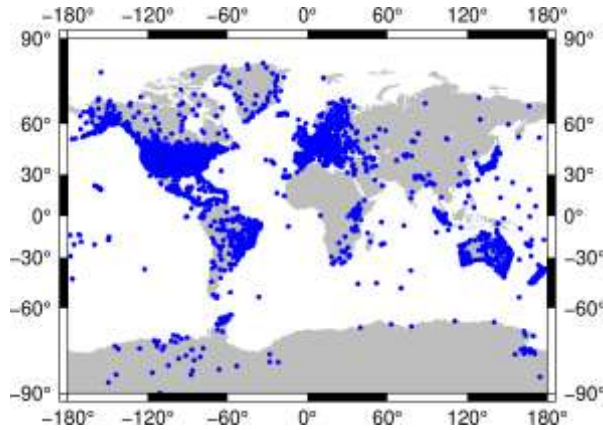


Рис. 1. Расположение постоянно действующих станций ГНСС, данные которых находятся в свободном доступе

Развитие ГНСС привело в последние годы к тому, что ГНСС (помимо основного назначения – определения координат) предоставляют огромный объем геофизической информации. В настоящем докладе рассматриваются ключевые параметры ГНСС, используемые для изучения эффектов космической погоды, и нерешенные проблемы в данной области.

ГНСС-ИЗМЕРЕНИЯ

Помимо своей основной задачи определения координат объектов, ГНСС позволяют получать ряд параметров для оценки эффектов космической погоды.

1. Фазовые и групповые измерения ионосферного полного электронного содержания (ПЭС), получаемые на основе двухчастотной комбинации, а также различные индексы на их основе [4]:

$$I_P = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + c\Delta t + \sigma P]; \quad (1)$$

$$I_\varphi = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + \sigma L], \quad (2)$$

- где
- f_1, f_2 – рабочие частоты ГНСС, Гц;
 - P_1, P_2 – измерения псевдодальности на первой и второй частотах, м;
 - $L_1 \lambda_1, L_2 \lambda_2$ – измерения фазового пути радиосигналов на первой и второй частотах, м;
 - L_1, L_2 – число оборотов фазы на рабочих частотах ГНСС;
 - λ_1, λ_2 – длины волн, м;
 - K – постоянная величина, определяемая неоднозначностью измерения фазы, м;
 - $\sigma P, \sigma L$ – шумовые погрешности, обусловленные шумами измерений группового и фазового путей, м;
 - Δt – дифференциальная кодовая задержка (ДКЗ), обусловленная разным временем распространения сигнала различных частот в радиотрактах спутника и приемника, с;
 - c – скорость света в вакууме.

На рис. 2 показано, что разные комбинации для измерения ионосферного ПЭС имеют различные шумовые характеристики. Обычно для мониторинга ионосферных неоднородностей используются фазовые измерения на двух частотах L1 и L2, характеризующиеся минимальными шумами [4]. Кроме того, на рисунке можно видеть следующую особенность ГНСС-измерений: ПЭС (1-2) содержит систематическое смещение, затрудняющее использование ГНСС для мониторинга абсолютных ионосферных параметров и коррекции ионосферных моделей.

Важно отметить, что все активнее развивается технология двухчастотных приемников малого размера, устанавливаемых в смартфонах [5]. В 2021 г. в продаже имелись устройства с восемью различными чипами. Если учесть, что количество пользователей смартфонов на несколько порядков превосходит пользователей специализированной аппаратурой, то можно ожидать в ближайшем будущем значительного повышения объема доступной геофизической информации.

2. Вариации интенсивности (отношения сигнал/шум) принимаемого сигнала и срывы измерения радионавигационных параметров. Такие явления возникают в результате воздействия солнечных радиовспышек и магнитных бурь [6]. Физический механизм воздействия на сигналы ГНСС для этих явлений различается. Во время солнечных радиовспышек возникают дополнительная широкополосная помеха на входе приемника, падение отношения сигнал/шум (рис. 3) и срыв сопровождения навигационного сигнала в следящих измерителях. Во время магнитных бурь происходят генерация мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (для средних широт взаимосвязано со значительным смещением аврорального овала [7]), рассеяние навигационного сигнала на таких неоднородностях и, в экстремальных условиях, срывы сопровождения навигационного сигнала (рис. 4).

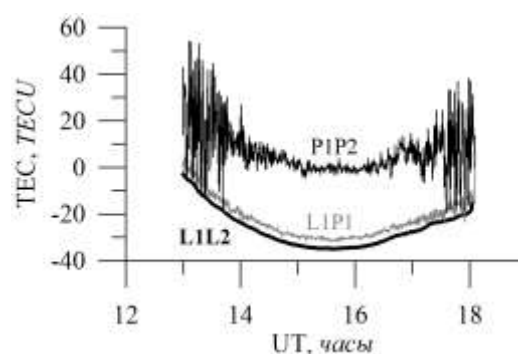


Рис. 2. Динамика ПЭС, полученного по двухчастотной комбинации L1L2 (нижняя черная кривая), одночастотной комбинации L1P1 (средняя серая кривая), двухчастотной комбинации P1P2 (верхняя черная кривая). Данные получены 22 июня 2015 г. на станции ISTR (ИСЗФ СО РАН, Иркутск) сети SibNet

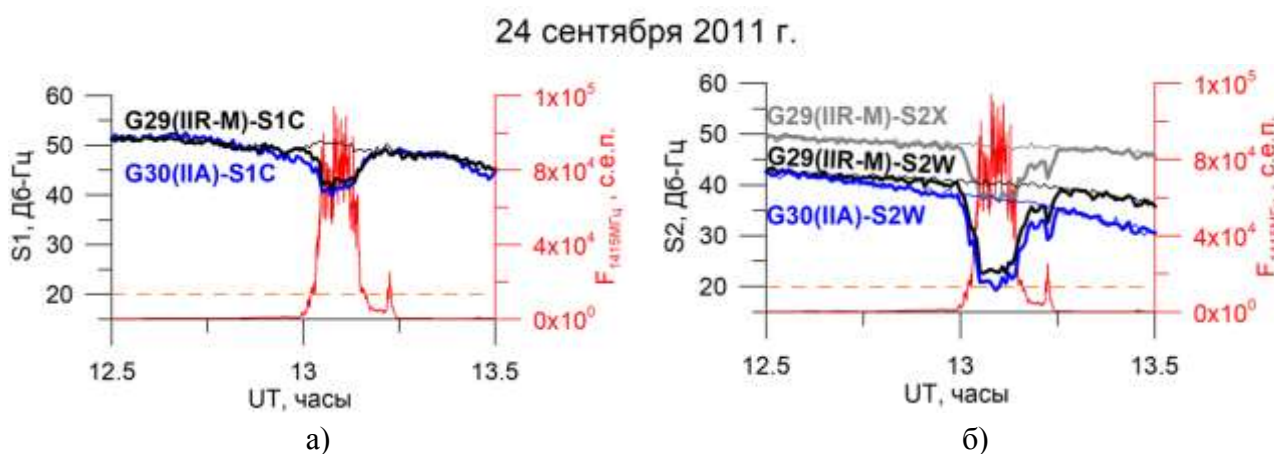


Рис. 3. Динамика отношения сигнал/шум различных сигнальных компонент навигационного сигнала GPS блоков IIR-M (G29) и IIA(G30) на основной частоте L1 (а) и вспомогательной частоте L2 (б) во время солнечной радиовспышки 24 сентября 2011 г. Красная кривая показывает уровень солнечного радиоизлучения на частоте 1415 МГц

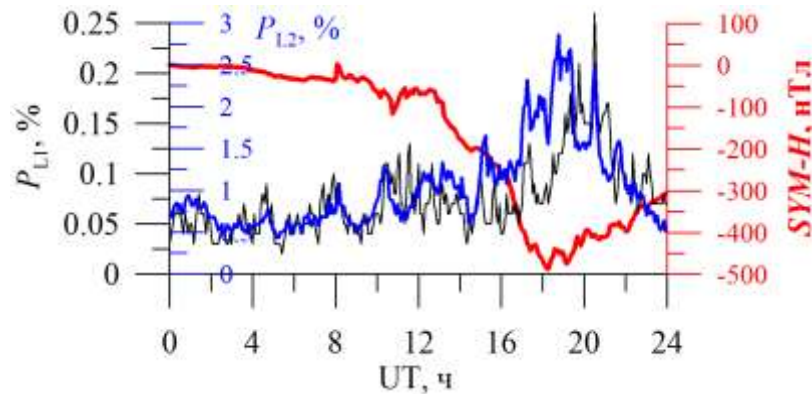


Рис. 4. Динамика срывов сопровождения фазы навигационного сигнала GPS на частотах L1 (черная кривая) и L2 (синяя кривая) во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. Красная кривая показывает индекс SYM-H, характеризующий развитие кольцевого тока

3. Ошибка координатных определений. Этот параметр является одновременно характеристикой воздействия космической погоды и состояния системы (рис. 5).

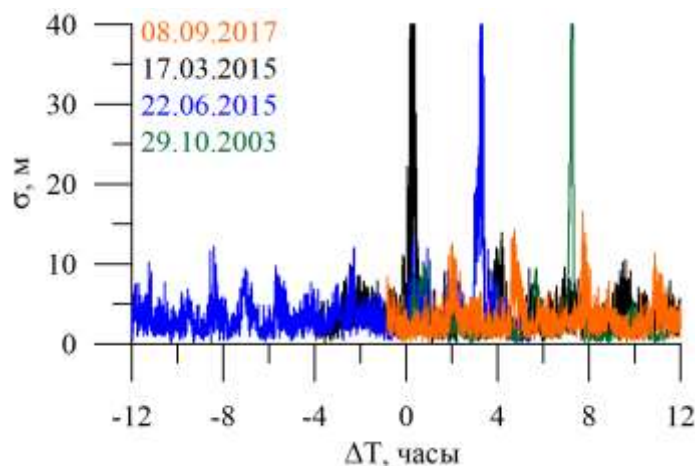


Рис. 5. Динамика ошибок позиционирования в двухчастотном режиме во время магнитных бурь 08.09.2017, 17.03.2015, 22.06.2015 и 29.10.2003. Данные антарктической станции CAS1. За 0 времени выбрано начало магнитной бури

Еще два параметра относят к методам дистанционного зондирования на основе ГНСС:

- 1) зенитная тропосферная задержка, включающая слагаемое, определяемое водяным паром [8];
- 2) рефлектометрическая информация о состоянии почвы и высотах объектов и покровов [9].

АБСОЛЮТНОЕ ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Константы, входящие в (1) и (2), не позволяют получать абсолютное ПЭС, требуемое для эффективного мониторинга эффектов воздействия космической погоды на радиотехнические системы [10]. Для устранения неоднозначностей ПЭС для одностанционного решения в [11] предложен алгоритм, основанный на разложении поля ПЭС в ряд Тейлора и методе наименьших квадратов с ограничениями на параметры:

$$I_M = S_j^i \left[I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta\phi_j^i + G_{\phi\phi} (\Delta\phi_j^i)^2 + \right. \\ \left. + G_l \Delta l_j^i + G_{ll} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{tt} (\Delta t_j^i)^2 \right] + I_{B,j} + b \cdot UT, \quad (3)$$

где ϕ, l, t – географические широта и долгота и время;
 S – функция преобразования вертикального ПЭС I_V в наклонное;
 G_a, G_{aa} – первая и вторая производная ПЭС по соответствующему параметру a (ϕ, l, t);
 I_B – константа, связанная с неоднозначностью измерений;
 b – константа, связанная с уходом часов приемника;
 UT – всемирное время.

Индексы i и j ставятся в соответствие моменту времени и номеру спутника.

Расчет вертикального ПЭС во время магнитной бури 17 марта 2015 г. представлен на рис. 6.



Рис. 6. Динамика ошибок позиционирования в двухчастотном режиме во время магнитных бурь 08.09.2017, 17.03.2015, 22.06.2015 и 29.10.2003. Данные антарктической станции CASI

После устранения констант неоднозначности абсолютное ПЭС может быть рассчитано для наклонных лучей и также использоваться для коррекции ионосферных моделей в интересах задач распространения радиоволн и коррекции ионосферной ошибки в радиотехнических системах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя ГНСС имеют большой потенциал для обеспечения геофизической информацией о полном электронном содержании и эффектах воздействия космической погоды на радиотехнические системы, требуются научно-организационные мероприятия по повышению их информативности в регионе Российской Федерации. Перечислим некоторые из них.

1. В силу относительно малого числа постоянно действующих станций на территории Российской Федерации необходимо дальнейшее развитие методов локальной и региональной оценки ПЭС. Для оперативного обеспечения ионосферной информацией во время воздействия негативных факторов космической погоды требуется повышение точности таких алгоритмов в условиях реального времени.

2. Необходимо развитие постоянно действующих сетей ГНСС реального времени. Так, например, появление Федерального центра навигационных данных (<https://fcnd.ru>) позволяет анализировать развитие аврорального овала (рис. 7) в российском секторе и строить более точные оценки его положения.

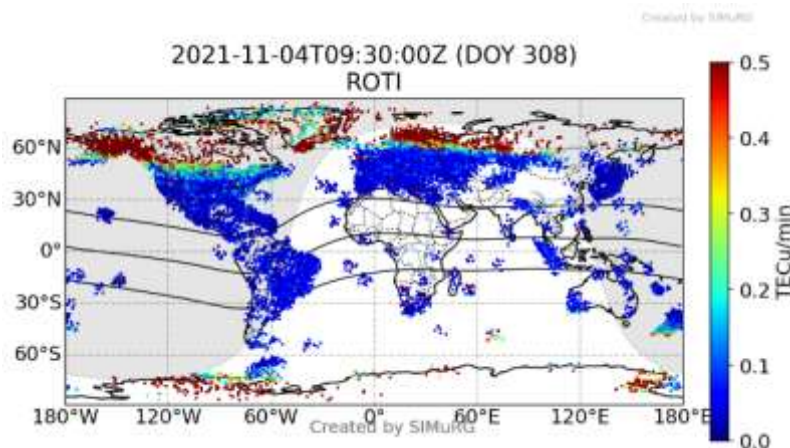


Рис. 7. Пространственное распределение индекса ROTI во время магнитной бури 4 ноября 2021 г. на основе данных мировых и российских сетей

3. Требуется создание аналитического центра/службы построения отечественных глобальных ионосферных карт реального времени. В настоящее время такие сервисы (в открытом доступе) работают в Китае и Евросоюзе [12]. В условиях отсутствия данных на территории РФ в этих сервисах, качество данных здесь не так высоко. Собственные сети наряду с открытыми мировыми источниками данных позволят решать вопрос моделирования в реальном времени самостоятельно.

4. Интегральных характеристик, которые предоставляют ГНСС, не достаточно для решения многих задач распространения радиоволн [1]. В этой связи, данные ГНСС должны комплексироваться другими установками, например ионозондами наклонного зондирования. При этом необходимо разработать методы эффективного объединения таких данных.

Автор выражает благодарность А. М. Веснину, В. В. Демьянову, А. В. Киселеву, А. А. Мыльниковой за совместную работу и помощь в подготовке данных.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-20005).

Список используемых источников

1. Ясюкевич Ю. В., Веснин А. М., Куркин В. И. Глобальные навигационные спутниковые системы как средство коррекции ионосферной ошибки радиотехнических средств: проблемы и перспективы // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 195–209. – DOI: 10.1007/s11141-021-10044-4.
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more. – Vienna: Springer, 2008. – 518 p. – DOI: 10.1007/978-3-211-73017-1.
3. Signal analysis of the first GPS III satellite / S. Thoenert [et al.] // GPS Solutions. – 2019. – Vol. 23. – 92. – DOI: 10.1007/s10291-019-0882-7.
4. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы. – Иркутск: Изд-во ГУ НЦ ВЧЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
5. An analysis of multi-GNSS observations tracked by recent Android smartphones and smartphone-only relative positioning results / J. Paziewski [et al.] // Measurement. – 2021. – Vol. 175. – 109162. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109162.

6. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. – Иркутск: изд-во ИГУ, 2014. – 349 с.
7. Small-Scale Ionospheric Irregularities of Auroral Origin at Mid-latitudes during the 22 June 2015 Magnetic Storm and Their Effect on GPS Positioning / Y. Yasyukevich [et al.] // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – 1579. – DOI: 10.3390/rs12101579.
8. О точности определений тропосферной задержки сигнала / В. В. Суворкин [и др.] // Труды ИПА РАН. – 2018. – Вып. 46. – С. 100–107. – DOI: 10.32876/AplAstron.46.100-107.
9. Spaceborne GNSS-R soil moisture retrieval: Status, development opportunities, and challenges / W. Wu [et al.] // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, № 1. – 45. – DOI: 10.3390/rs13010045.
10. Методы компенсации ионосферной составляющей ошибки радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС / Ю. В. Ясюкевич [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2017. – Т. 34, № 2. – С. 19–31. – DOI:10.15350/2306-2819.2017.1.19.
11. Yasyukevich Y., Mylnikova A., Vesnin A. GNSS-Based Non-Negative Absolute Ionosphere Total Electron Content, its Spatial Gradients, Time Derivatives and Differential Code Biases: Bounded-Variable Least-Squares and Taylor Series // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 19. – 5702. – DOI: 10.3390/s20195702.
12. Status of CAS global ionospheric maps after the maximum of solar cycle 24 / Z. Li [et al.] // Satellite Navigation. – 2021. – Vol. 2. – 19. – DOI: 10.1186/s43020-021-00050-2.

Aniskina O. G., Stognieva V. V., Tolstobrova N. B. Thunderstorm forecast using meso-scale hydrodynamic models // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 6–10.

The results of calculations of indices of thunderstorm activity based on data obtained with the help of hydrodynamic forecast are presented. A numerical experiment was carried out to simulate a thunderstorm situation using physical-statistical and hydrodynamic forecasting methods. Different schemes of convection parameterization in the meso-scale non-hydrostatic general use model WRF-ARW are analyzed. A quantitative and qualitative assessment was made of the correspondence between the prognostic fields of a high probability of thunderstorms and the actual data of the SCRL (weather radar).

Key words: hydrodynamic modeling, convection parameterization, forecast of dangerous weather phenomena, index of thunderstorm activity.

Monitoring of hydrometeorological processes in the Arctic region with Arctica-M N1, GCOM-W1, GPM, Meteo-M N2-2, MetOp and Aqua satellites / A. V. Baranyuk, V. P. Kuleshov, L. M. Mitnik, M. L. Mitnik, M. A. Panfilova // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 11–18.

The possibilities of tracing the processes and phenomena in the atmosphere and on the surface in the Arctic region on the basis of images in the visible and infrared wavelengths from the Arctica-M N1 satellite and data of microwave passive and active sensing received from a family of low-orbiting satellites from different countries are considered. Examples are given of the joint analysis of data providing quantitative information on the spatial and temporal variability of the fields of hydrometeorological parameters, which can be used in solving problems of operational monitoring and in scientific studies of the polar regions of the Earth.

Key words: Arctica-M N1, microwave radiometers, radars, hazards, gale force winds, cloud cover, SMP, monitoring.

Beituganov M. N., Chochaev H. H. Method of preventing and interrupting hail by initiating artificial lightning // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 19–26.

The transition of the thunderstorm stage of the development of a powerful cumulus cloud into the hail stage is associated with lightning discharges, the streamer zone of which introduces an excessive volumetric charge with a concentration of 10^{17}m^{-3} ions into the cloud space. The giant particles of the micro-mixture of the atmosphere with dimensions of 2-60 microns and more, whose concentration on hail days reaches $10^4\text{-}10^5 \text{m}^{-3}$, precipitating ions on themselves, become sources of grain and droplet hail germs. The creation of additional hail nuclei with the help of artificially initiated lightning and the collapse of accumulation zones formed by suspended lightning clouds in the electrostatic field is the physical basis of the proposed combined method of interrupting and preventing hail by artificially initiated lightning. To initiate lightning, standard anti-hail missiles with a conductive surface were used.

Key words: combined method, hailstorm cloud, hail, conductive surface, impact.

Phenomena in the high latitude ionosphere F-region induced by simultaneous radiation of O- and X-polarized HF pump waves / N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, I. M. Egorov, A. S. Kalishin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 27–32.

We report experimental results from multi-instrument diagnostic tools related to phenomena in the high latitude ionosphere F-region induced by the simultaneous radiation of extraordinary (X-mode) and ordinary (O-mode) polarized powerful HF radio waves. In the course of experiment the effective radiated power (ERP) of the X-mode wave was 130.5 MW, while the portion of the O-mode ERP was 29.9 MW (about 20% from the full ERP). It was found that in such conditions the excitation of effects typical for both X- and O-mode HF pump waves occurred.

Key words: powerful HF radio wave, polarization, high latitude ionosphere, stimulated electromagnetic emission, artificial field-aligned irregularities, plasma waves.

Borisov A. A., Kuleshov Y. V., Makov A. B. A method for evaluating the effectiveness of forecasting hydrometeorological conditions while ensuring the actions of troops (forces) // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 33–38.

Analytical dependences of determining the efficiency indicators and the required efficiency of forecasting hydrometeorological conditions using the mathematical apparatus of probability theory and the theory of the effectiveness of purposeful processes are obtained. Based on the presented dependencies, a method has been developed for evaluating the effectiveness of forecasting hydrometeorological conditions, which can be used by operational and predictive units of the hydrometeorological service.

Key words: forecasting of hydrometeorological conditions, efficiency indicator, hydrometeorological service, grouping of troops, hydrometeorological information.

Bulkin V. V., Miheeva S. A. Assessment of the level of atmospheric air pollution by exhaust gases of vehicles on the section of the main streets of the city of Murom // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 39–46.

It is convenient to assess air pollution by car exhaust gases by the concentration of carbon monoxide (carbon monoxide, CO), mg/m³. The largest amount of exhaust gases is released when idling, accelerating and braking. That is why the greatest number of emissions is detected on those main streets, which are characterized by a large number of cars, their slow movement and concentration at almost every intersection. The assessment of the level of atmospheric air pollution by exhaust gases of vehicles on the section of the main streets of the city of Murom is presented. Estimated calculations and practical measurement of the concentration of CO on the main highways of the city were carried out. The conclusion is made about the potential threats of exceeding the maximum permissible values from 2.4 to 8.4 times. However, the actual values of the CO concentration show that, in general, the situation in Murom from the point of view of compliance with the norms of carbon monoxide content does not cause concern and is within acceptable limits. Short-term (up to 2-3 MPC) exceedances occur only in some areas of the city.

Key words: assessment of the level of atmospheric air pollution, exhaust gases of motor vehicles, sections of main streets, CO concentration, carbon monoxide.

Bunina Y. E. Method for assessing the influence of hydrometeorological conditions in correcting IR images of objects and backgrounds under conditions of their natural variability // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 47–53.

A method is presented for estimating the influence of hydrometeorological conditions (HMC) when correcting IR images of objects and backgrounds under conditions of their natural variability. This method makes it possible to take into account not only the geometric and thermophysical properties of the modeling object when correcting IR images, but also to clarify the effect of the

amount of incoming solar radiation depending on geographical location and time, the presence of cloudiness, relative air humidity and wind speed, when recalculating the values of radiation contrasts surface temperatures for the expected period. Examples of the results of IR image correction taking into account HMC are presented.

Key words: method, hydrometeorological condition radiation temperature contrasts, IR image, heat balance, thermal conductivity.

Bunina Y. E., Letuchyi Y. A. A model for estimating the contrasts of radiation temperatures of objects and backgrounds on the ground // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 54–59.

A model for estimating the contrasts of radiation temperatures of objects and backgrounds on the ground with the combined account of convection and radiation is presented. The model also takes into account the presence of clouds, the value of relative humidity, wind speed when determining radiation temperatures in the area under consideration. The conditions of unambiguity containing: initial, physical, geometric and boundary conditions are considered. The model is characterized by the possibility of taking into account the complex geometry of the object, multi-element, as well as taking into account the thermophysical and optical properties of materials used in calculations.

Key words: contrast of radiation temperatures, boundary conditions, thermal balance, hydrometeorological conditions, non-stationary thermal conductivity.

Integrated land assessment model using multispectral satellite data and field measurements / S. A. Bucharkin, O. V. Grigogieva, V. F. Mochalov, N. V. Shkurov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 60–65.

The process of systematic assessment of the state of agricultural lands based on the processing of materials from regular satellite surveys and ground survey data is considered. In order to increase the efficiency and reliability of the assessment, a comprehensive model has been developed and tested in practice, providing the introduction of information technologies for automated processing of multispectral satellite imagery materials. The model provides for the following basic operations: collection of initial data; calculation of indicators characterizing the state of the land; verification of calculation results based on ground surveys; assessment of the condition of the land, planning of the control action and further execution of work. The result of the application of a complex model is demonstrated by the example of assessing the degree of overgrowth of agricultural land. For the practical use of the proposed methodological apparatus, it is advisable to form an agreed list of the most important assessed indicators characterizing the condition of the lands and proceed to systematization of spectral-brightness features for automated land assessment taking into account seasonal variability.

Key words: Spectral-brightness features, controlled indicators, multispectral satellite imagery, automated processing, verification, ground surveys.

Experimental network of sensors for lightning activity monitoring / I. A. Gotur, E. A. Korovin, S. V. Chernishev, G. G. Shchukin, I. E. Yusupov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 66–74.

The article presents the results of the work aimed at creating a multi-position experimental network for monitoring thunderstorm activity. Calculations of zones of equal accuracy for variants of implementation of goniometric and difference-range methods for determining coordinates are given. The first results of estimating the errors in determining the direction of the lightning discharge by sensors are presented.

Key words: thunderstorm monitoring, determination of the coordinates of lightning discharges, direction finder, triangulation, lightning sensor, zones of equal accuracy.

Grigoriev A. N., Dementiev D. S., Zuev L. G. An approach to improving the quality of Earth remote sensing data using a generative-adversarial neural network // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 75–83.

The research is devoted to the development of an approach to improving the spatial resolution of images using a generative-adversarial neural network. The developed procedure for increasing the resolution makes it possible to improve the quality of images without negative blurring of the boundaries of objects, which is characteristically manifested as a result of using standard tools. The modification of the generative-adversarial network was completed by introducing a loss indicator based on the model of an additional convolutional neural network.

Key words: remote sensing of the Earth, optoelectronic imaging, image, super-resolution, artificial neural network, generative-adversarial network, spatial resolution.

Davydov S. A., Zablotzky R. A., Timoshchuk A. S. Monitoring of the state of the ozone layer in the Arctic region using meteorological satellites // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 84–91.

The article presents the results of the analysis of the state of the ozone layer and the causes of its destruction in the Arctic region in different periods of the year. The authors propose the use of space satellite means of remote sensing of the Earth to study the climatic features of the state of the ozone layer. Recommendations are given on the interpretation of satellite ozonometric data and their application to protect people during dangerous periods of ozone layer reduction in the Arctic region.

Key words: ozone layer, meteorological satellites, ultraviolet radiation, control, Arctic region.

Denisenkov D. A., Zhukov V. Y., Shchukin G. G. Experimental studies of reflection amplitude distribution from meteorological formations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 92–99.

The modern weather radar capabilities to detection by the hydrometeors vertical motion associated with microbursts and updrafts inside powerful cumulonimbus clouds are analyzed. The peculiarities applications of the estimations of mean radial velocity of particles, the absolute value of cross-correlation coefficient of polarization constituents of received signal, spectrum width received reflections are considered. The conclusion about the prospects of using the last of these parameters is made.

The article polemises with researchers who believe that the distributive law of reflections from meteorological formations is not Gaussian law and justify their position with the help of various data published in the press. The peculiarities of obtaining such experimental data are considered, after which a conclusion is made about the preferable use of the results of our own experiments, the details of which are well known. The results of the authors' experimental studies based on the MRL-5 meteorological radar are presented. The technical equipment and methods used in them are described. A conclusion is made that in the authors' observed cover precipitation in the form of rain and snow, the distribution of the amplitude of the reflections created by them is close to the Rayleigh distribution, which indicates the Gaussian law distribution of the signal itself.

Key words: meteorological radar, the distributive law of the amplitude of signal, remote sensing.

Development of the state ionosphere monitoring system in the interests of providing the armed forces of the Russian Federation with geophysical information / V. I. Denisova, S. V. Zhuravlev,

N. G. Kotonaeva, I. V. Romanov, K. G. Tsybulya // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 100–107.

The state of affairs in the issues of ionospheric provision of the Armed Forces of the Russian Federation with a State system for monitoring the geophysical situation, including means observation, data processing software, ionospheric modeling system, software for creating information products is given.

Key words: ionosphere monitoring, ionosphere radiosonding, ionospheric models, information products.

Artificial atmospheric formations: methods and technical means of creation, fields of application / A. P. Doronin, S. I. Kozlov, V. M. Petrochenko, V. V. Filippenok // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 108–115.

The article proposes a new classification of atmospheric formations, which includes fogs of natural origin and artificial atmospheric formations of anthropogenic origin. The methods and technical means of purposefully creating artificial atmospheric formations (artificial clouds and fogs), as well as possible areas of their application, are considered.

Key words: artificial atmospheric formations, artificial clouds and fogs, chemical reagents, technical means.

Doronin A. P., Petrochenko V. M., Filippenok V. V. A model of the spatiotemporal distribution of meteorological conditions in the region of the Middle Urals in relation to the problem of creating artificial fogs in order to solve environmental problems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 116–123.

Based on the processing of meteorological observation materials contained in the VNIIGMI-MCD information database, the article presents the results of the analysis of meteorological conditions (atmospheric phenomena and meteorological quantities) in the Middle Urals region, applied to the problem of creating artificial fogs to solve environmental problems.

Key words: fog, artificial fog, air temperature, air humidity.

Imanova A. S., Smyshlyaev S. P. A study of the dynamic factors for the formation of ozone anomalies in polar latitudes // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 124–132.

An analysis of the interannual variability of the total content of variable ozone in the Antarctic and Arctic regions for the period from 1980 to 2020 is presented. Linear trends were expected for three periods - from 1980 to 2020, from 1980 to 1999. and from 2000 to 2020 The influence of the meridional flow at the boundary of the polar region as a characteristic of the residual circulation on the circumpolar vortex is studied. Its influence on the change in the total ozone content is estimated. The analysis is based on satellite measurements and MERRA-2 atmospheric reanalysis. In the course of the study, it was possible to establish that the variability of the meridional flow at the boundary of the polar region can show an indicator of external influence on the circumpolar vortex. The meridional flow determines the exchange of air between latitudes, the rate of determining the degree of release of polar air, which is an integral part of the intensity that reveals the ozone content in the atmosphere of polar environments in the winter-spring period.

Key words: total ozone, ozone hole, polar vortex, Arctic, Antarctic, reanalysis data, satellite data.

Kagermazov A. Kh., Sozaeva L. T. Hail forecast and estimation of its size based on the atmospheric global mathematical model // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 133–140.

The forecast of hail was made by methods of statistical analysis and its maximum size was determined. To calculate the parameters of the atmosphere, instead of the data of the factual aerological sounding, the output of the global atmospheric model GFS NCEP with a 24-hour lead time was used. The research was carried out for the «Mineralnye Vody» weather station in the Central part of the North Caucasus. Indicators of the quality and success of the proposed hail forecast turned out to be high. The parameters characterizing the quality, statistical significance and practical applicability of the regression model for estimating the size of hail also showed the possibility of their application in predicting the maximum diameter of hail.

Key words: global atmospheric model, hail forecast, aerological sounding, convection, meteorological parameters.

Application of ground-based microwave radiometers for the diagnosis of mesostructure of atmospheric fronts / D. M. Karavaev, A. B. Lebedev, N. O. Moiseeva, G. G. Shchukin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 141–146.

There are discussed possibilities of a ground-based microwave radiometry for the diagnosis of mesoscale structure of the atmospheric fronts. The methodology of the research is briefly given and the some results of the experiments conducted in Leningrad region are considered. To determine the water vapor content of the atmosphere and the cloud liquid water content were used the microwave dual-channel microwave water vapor radiometer operating at frequencies near the water vapor line of 22.235 GHz. As an example, the case of the passage of cyclone atmospheric fronts in the Leningrad region in September 2020 is discussed.

Key words: microwave radiometer, atmospheric front, integrated water vapor, cloud liquid water content.

Large-scale ionospheric disturbances caused by the injection of combustion products from the engines of launching rockets / D. A. Kobernik, V. V. Lukin, V. V. Rudenko, I. A. Rybin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 147–156.

Analytical model for estimation changes of ionosphere composition under injection combustion products from running engines of launching powerful vehicles, which includes the solution of equations for neutral and electron concentrations, is presented. The obtained data allow us to evaluate the total electron content along the specified trajectories and compare it with the measurements results obtained using a network of GPS receivers.

Key words: GPS ionosphere monitoring, total electron content, launching vehicles, remote diagnostics of the ionosphere, release of burn products into ionosphere plasma.

Kolesnikov E. V. Development of the information system of archival storage of the State Fund of Roshydromet // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 157–166.

The analysis of the current state of the information system of archival storage of the State Fund of Roshydromet was carried out with a description of the information processes of collecting, processing, storing and providing hydrometeorological information.

A study of the regulatory framework regarding the storage of the State Fund of Roshydromet, the structure and formats of information objects (archival storage documents), as well as the functional, information, system, software, data architecture of IS, in the context of the current information processes of the object of study - the State Fund of Roshydromet.

As a result, problem areas were identified for each information process, and a number of measures were proposed to modernize them through the use of modern scientific and technical means, methods and algorithms for the development of IS. This approach will make it possible to improve the quality of the relevant management characteristics, long-term storage and prompt provision of hydrometeorological information and products to consumers.

Key words: the State Fund of Roshydromet, archival document, information system, information technology, electronic archive, hydrometeorological information, long-term storage, remote access, basic archive, customer service.

Korystin A. A., Kulshov Y. V. Geophysical support for the use of radar and radio navigation systems. // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 167–185.

A generalization of information available in the literature on the influence of the atmosphere on radar and radio navigation systems, as well as information on the possibilities of compensating this influence, is carried out. A comparative analysis of the effectiveness of compensation for the influence of the environment from the point of view of the theory of synthesis of specialized methods for diagnosing geophysical conditions has been carried out, problematic issues have been identified and further prospects for the development of a system for geophysical support for the use of radar and radio navigation systems have been substantiated.

Key words: geophysical support, diagnostics of geophysical conditions, radar efficiency, radio navigation efficiency, influence of the atmosphere on radio engineering systems, ionospheric models, ionospheric observations.

Kostromitinov A. V., Yaremenko I. A. Method of forecasting fog with use artificial convolutional neural networks // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 186–193.

The method for calculating the forecast time of fog. This method available to forecast fog with 3 or 12 hours time interval. For forecasting uses artificial convolutional neural networks, which based on weather measurement data.

Key words: artificial neural networks, distributed data processing, machine learning, meteorological data.

Mathematical apparatus of numerical modelling of electromagnetic waves propagation in spatially inhomogeneous ionospheric plasma / N. V. Lebedev, N. P. Lesik, V. V. Lukin, S. A. Nazarov, V. A. Nikolskiy, V. V. Rudenko // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 194–201.

Three-dimensional numerical model, adapted for solving problems of electromagnetic waves propagation in spatially inhomogeneous plasma, was considerate in this article.

Key words: numerical modelling, plasma, electromagnetic waves.

Letuchiy Y. A. Indicators of chemical pollution of the seas of Russia // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 202–206.

It is investigated possibilities of the water pollution index (WPI) and marine pollution indicator (MPI) to assess the effectiveness of sea environmental activities. The MPI is calculated according to the data of the WPI, presented in the yearbooks «Quality of the sea waters by hydrochemical values». The MPI makes it possible to rank the seas according to the degree of chemical pollution of coastal areas.

Key words: water pollution index, water quality class, state monitoring of water objects, chemical pollution of the water area, water pollution indicator.

Lobyntsev V. V., Maksimov M. V., Muchametshin I. T. Modern problems and solutions to ensure the environmental safety of ships and vessels of the Navy // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 207–212.

Ships and vessels of the Navy are designed and built taking into account the requirements of MARPOL 73/78 Convention, Russian legislation and other normative acts and documents. It is possible to fulfill all requirements to environmental safety of ships and vessels only having actual legal and scientific-technical knowledge, organizational mechanism, technical and software means, including information support of the crew, means for prevention and elimination of marine environment pollution. The organization of environmental safety of naval forces requires improvement. The top-priority organizational measures and technical means to ensure environmental safety of ships and vessels of the Navy are recommended.

Key words: ships, vessels, environmental safety, conventions, marine environment, pollution, information support, modeling, environmental expertise.

Nagorskiy P. M., Pustovalov K. N., Smirnov S. V. Diurnal and seasonal variations of the undisturbed electric field and its relation with the geophysical quantities in the south of Western Siberia. Application of spacecraft data and ground-based observations to analyze embedded convection in frontal cloud systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 213–222.

Analysis of the diurnal and seasonal variations of the undisturbed electric field in the fair-weather condition in the south of Western Siberia was carried out using the example of Tomsk. It is shown that diurnal variations of potential gradient are characterized by fluctuations of the continental type with a double maximum and minimum. Estimates of the relationship between the diurnal and seasonal variability of potential gradient and the variability of the some geophysical quantities are obtained.

Key words: atmospheric electricity; potential gradient; fair-weather condition.

Roslov L. D., Semenov V. V., Chuvirova K. I. A method for estimating the characteristics of atmospheric transparency for infrared radiation in the far infrared range in areas not illuminated by meteorological observations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 223–228.

The procedure for estimating the characteristics of atmospheric transparency for infrared radiation in the far infrared range in areas not illuminated by meteorological observations is presented. A general block diagram of the Method and quality assessment is presented for the accuracy of estimating the transparency coefficient of the atmosphere in comparison with similar methods using the example of one physical and geographical area.

Key words: atmospheric transparency coefficient, thermal imaging payload, IR radiation.

Prospects of modernization of multi-frequency microwave radiometric systems for remote sensing of the atmosphere with the introduction of an optical information transmission channel /

I. N. Rostokin, E. A. Rostokina, E. V. Fedoseeva, G. G. Shchukin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 229–235.

The article analyzes the prospects of modernization of multi-frequency microwave radiometric systems for remote sensing of the atmosphere. The analysis of options for the use of radiophotonics devices for the improvement of multi-frequency microwave remote sensing systems is carried out. A variant of a quad-band microwave radiometric system with an optical information transmission channel is proposed. The known variants of radiophoton nodes that are part of the optical information transmission channel of a multi-frequency microwave radiometric system are considered.

Key words: multi-frequency microwave radiometric systems, remote sensing of the atmosphere, optical information transmission channel, radiophotonics.

Shuleikin V. N., Schukin G. G. Use of elements of surface atmospheric electricity in problems of applied geophysics // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 236–244.

In most cases, a reverse electrode effect is formed over geological heterogeneity, leading to a decrease in the atmospheric electric field and an increase in the polar conductivities of the air. Registration of these changes from a moving vehicle makes it possible to track the contours of geological heterogeneities on the earth's surface in a non-contact way in real time.

Key words: reversible electrode effect, atmospheric electric field, polar conductivities, geological heterogeneity.

Yasyukevich Y. V. The potential of global navigation satellite systems to provide information on the space weather effects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 685: Problems of military-applied geophysics and environmental control. – P. 245–251.

Over the Russian Federation, due to development in the space segment, the global navigation satellite systems (GNSS) provide a large set of information about the space weather effects. We review the state of the problem of absolute ionospheric total electron content (TEC) according to GNSS data with an emphasis on a single-station solution. The article shows the variations in the measured GNSS signal-to-noise ratios, as well as the position precision. Conclusions contain areas of work in the near future.

Key words: GNSS, GLONASS, GPS, total electron content, space weather.

Анискина Ольга Георгиевна, кандидат физико-математических наук, доцент; Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79); тел.: 8 (812) 633-01-74, e-mail: olga.aniskina@mail.ru

Баранюк Анастасия Вячеславовна, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: 8 (423) 231-28-54, e-mail: vykochko@poi.dvo.ru

Бейтуганов Мусаби Ногманович, доктор физико-математических наук; Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Кавказская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы» (360016, Россия, КБР, Нальчик, ул. Абидова, 18).

Благовещенская Наталья Фёдоровна, доктор физико-математических наук; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); тел.: 8 (921) 303-88-15, e-mail: nataly@aari.nw.ru

Борисов Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Борисова Татьяна Дмитриевна, кандидат физико-математических наук; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); тел.: 8 (921) 752-80-41, e-mail: borisova@aari.ru

Булкин Владислав Венедиктович, доктор технических наук, доцент; Муромский институт (филиала) ФГБОУВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н. Г. Столетовых» (602264, Владимирская обл., Муром, ул. Орловская, 23); e-mail: vbulkin@mail.ru

Бунина Юлия Евгеньевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-10.

Бухаркин Сергей Александрович, Военный инновационный технополис «ЭРА» (353456, Россия, Краснодарский край, Анапа, Пионерский пр., 41); тел.: 8 (953) 403-16-04, e-mail: erabukharkin@yandex.ru

Готюр Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Григорьев Андрей Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: vka@mil.ru

Григорьева Ольга Викторовна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 978-85-18, e-mail: alenka12003@mail.ru

Давыдов Степан Андреевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52.

Дементьев Денис Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51, 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

Денисова Валентина Ивановна, Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, Ростокинская, 9); тел.: 8 (919) 993-64-79, e-mail: denisova@ipg.geospace.ru

Доронин Александр Павлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 943-66-40, e-mail: doronin52@mail.ru

Егоров Иван Михайлович, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); тел.: 8 (952) 237-24-08, e-mail: egorovneva@gmail.com

Жуков Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 998-12-06, e-mail: vka@mil.ru

Журавлев Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук; Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, Ростокинская, 9); тел.: 8 (916) 681-68-23, e-mail: zhuravlev@ipg.geospace.ru

Заблоцкий Роман Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52.

Зуев Лев Геннадьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: vka@mil.ru

Иманова Анастасия Сергеевна, Лаборатория «Исследований Озонового слоя и Верхней Атмосферы» (198504, Россия, Петергоф, ул. Ульяновская, 1, корп. И); Санкт-Петербургский государственный университет (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9); тел.: 8 (999) 874-25-29, e-mail: imanova.an@mail.ru

Кагермазов Артур Хасанбиевич, кандидат физико-математических наук; ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2); тел.: 8 (928) 720-35-96, e-mail: ka5408@mail.ru

Калишин Алексей Сергеевич, кандидат технических наук; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); тел.: 8 (905) 267-46-91, e-mail: askalishin@aari.ru

Караваев Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka@mil.ru

Коберник Дмитрий Александрович, кандидат технических наук; ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26).

Козлов Станислав Иванович, доктор физико-математических наук; Институт динамики геосфер РАН (119334, Россия, Москва, Ленинский пр., 38/1); тел.: 8 (499) 137-66-11, e-mail: s_kozlov@inbox.ru

Колесников Евгений Владимирович, Центр гидрометеорологических данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (249035, Россия, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 6); тел.: 8 (920) 873-17-53, e-mail: ekolesnikov@meteo.ru, evgeni-kolesnikov@mail.ru

Коровин Евгений Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 279-95-961, e-mail: evgen_korovin@mail.ru

Корыстин Александр Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 590-10-30, e-mail: vka@mil.ru

Костромитинов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Котонаева Надежда Геннадьевна, доктор физико-математических наук, доцент; Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, Ростокинская, 9); тел.: 8 (903) 548-51-59, e-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru

Кулешов Владимир Павлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: 8 (423) 231-28-54, e-mail: 986022@mail.ru

Кулешов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Лебедев Андрей Борисович, кандидат технических наук, доцент; Российский государственный гидрометеорологический университет (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); тел.: 8 (921) 974-30-46, e-mail: lebandbor@rambler.ru

Лебедев Николай Вячеславович, кандидат технических наук; ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б); тел.: 8 (916) 569-69-87, e-mail: leb_nick@mail.ru

Лесик Никита Петрович, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б).

Летучий Юрий Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 927-51-85.

Лобынцев Валентин Васильевич, кандидат технических наук, доцент; ЗАО «НПФ «АРГОС» (190068, Россия, Санкт-Петербург, Бойцова пер., 4, пом. 4 Н, офис 2); тел.: 8 (921) 945-01-17; e-mail: vvlobyncev@mail.ru

Лукин Виталий Владимирович, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б); тел.: 8 (926) 686-51-62, e-mail: lukinvv@mail.ru

Маков Александр Борисович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mail.ru

Максимов Максим Владимирович, кандидат технических наук; Главное командование Военно-Морского Флота (191055, Россия, Санкт-Петербург, Адмиралтейский пр-д., 1).

Митник Леонид Моисеевич, доктор физико-математических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: 8 (423) 231-28-54, e-mail: lm_mitnik@mail.ru

Митник Майя Львовна, кандидат технических наук; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва» Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: 8 (423) 231-28-54, e-mail: maia_mitnik@mail.ru

Михеева Светлана Александровна, Муромский институт (филиала) ФГБОУВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых» (602264, Россия, Владимирская обл., Муром, ул. Орловская, 23); e-mail: svetlanamiheeva16@gmail.com

Моисеева Наталья Олеговна, кандидат технических наук; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации (196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38); тел.: 8 (904) 602-37-77, e-mail: natali.ziadinova@yandex.ru

Мочалов Виктор Фёдорович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 916-12-09, e-mail: vicavia@yandex.ru

Мухаметшин Игорь Тимербулатович, Главное командование Военно-Морского Флота (191055, Россия, Санкт-Петербург, Адмиралтейский пр-д., 1).

Нагорский Петр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор; ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (634021, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); тел.: 8 (3822) 49-15-65, e-mail: nrm_sta@mail.ru

Назаров Сергей Алексеевич, ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б); тел.: 8 (999) 095-40-51, e-mail: nazartos@gmail.ru

Никольский Василий Александрович, кандидат технических наук; ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 2б); тел.: 8 (926) 148-53-35, e-mail: va.nikolsky@gmail.ru

Панфилова Мария Андреевна, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук (603155, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46); тел.: 8 (831) 432-14-77, e-mail: marigo@mail.ru

Петроченко Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 764-42-70, e-mail: vmpetrochenko@mail.ru

Пустовалов Константин Николаевич, кандидат физико-математических наук; ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (634021, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3), ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Томская обл., Томск, пр. Ленина, 36); тел.: 8 (3822) 49-15-65, e-mail: const.pv@yandex.ru

Романов Илья Владимирович, кандидат физико-математических наук; Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, Ростокинская, 9); тел.: 8 (916) 316-44-55, e-mail: romanov@ipg.geospace.ru

Рослов Леонид Дмитриевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka@mil.ru

Ростокин Илья Николаевич, доктор технических наук, доцент; Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых» (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); тел.: 8 (920) 944-15-84, e-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

Ростокина Елена Анатольевна, кандидат технических наук, доцент; Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых» (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); тел.: 8 (920) 925-78-72, e-mail: arostockina@yandex.ru

Руденко Виталий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент; ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26).

Рыбин Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент; ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (141300, Россия, Сергиев Посад, ул. Весенняя, 26).

Семенов Вячеслав Валерьянович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 184-87-26, e-mail: vka@mil.ru

Смирнов Сергей Васильевич, кандидат физико-математических наук; ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (634021, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); тел.: 8 (3822) 49-26-81, e-mail: smirnov@imces.ru

Смышляев Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, профессор; Российский государственный гидрометеорологический университет (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); тел.: 8 (911) 276-58-08, e-mail: smyshl@rshu.ru

Созаева Лежинка Танашевна, кандидат физико-математических наук, доцент; ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2); тел.: 8 (928) 723-20-08, e-mail: ljk_62@rambler.ru

Стогниева Виктория Владимировна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52.

Тимошук Александр Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (981) 848-32-95, e-mail: astim2@yandex.ru

Толстоброва Наталия Борисовна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka@mil.ru

Федосеева Елена Валерьевна, доктор технических наук, доцент; Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых» (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); тел.: 8 (905) 144-42-06, e-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Филиппёнок Виктор Викторович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 940-54-59, e-mail: vitya.fil@mail.ru

Цыбуля Константин Григорьевич, кандидат физико-математических наук; Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, Ростокинская, 9); тел.: 8 (964) 634-41-01, e-mail: kgc@ipg.geospace.ru

Чернышев Сергей Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Чочаев Хизир Хусейнович, кандидат физико-математических наук; Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Кавказская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы» (360016, Россия, КБР, Нальчик, ул. Абидова, 18); e-mail: gradskvs@rambler.ru

Чувирова Кристина Игоревна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-69, e-mail: vka@mil.ru

Шкуров Николай Владимирович, Военный инновационный технополис «ЭРА» (353456, Россия, Краснодарский край, Анапа, Пионерский пр., 41); e-mail: shkurovNV@yandex.ru

Шулейкин Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук; Центр инновационных нефтегазовых технологий Института проблем нефти и газа РАН (119971, Россия, Москва, ул. Губкина, 3); тел.: 8 (499) 135-73-71, e-mail: shvn1947@yandex.ru

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых» (602264, Владимирская обл., Муром, ул. Орловская, 23); тел.: 8 (921) 899-55-05, e-mail: vka@mil.ru

Юсупов Игорь Евгеньевич, кандидат физико-математических наук; Санкт-Петербургский государственный университет (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9).

Яременко Иван Андреевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Ясюкевич Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент; Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А); тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

Анискина Ольга Георгиевна, кандидат физико-математических наук, доцент; Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79); тел.: 8 (812) 633-01-74, e-mail: olga.aniskina@mail.ru

Готюр Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka@mil.ru

Григорьев Андрей Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: vka@mil.ru

Доронин Александр Павлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 943-66-40, e-mail: doronin52@mail.ru

Жуков Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 998-12-06, e-mail: vka@mil.ru

Кадыгров Евгений Николаевич, доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, доцент; Лаборатория дистанционного зондирования ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (141701, Московская обл., Долгопрудный, ул. Первомайская, 3); тел.: 8 (495) 408-61-48, e-mail: secretary@cao-rhms.ru

Караваяев Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: dm.karavaev@mail.ru

Коровин Евгений Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 279-95-961, e-mail: evgen_korovin@mail.ru

Корыстин Александр Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 590-10-30, e-mail: geoalex2003@mail.ru

Краснов Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (981) 848-32-95, e-mail: vmkrasnov@yandex.ru

Крюковский Андрей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор; Институт ИСиКТ Автономной некоммерческой организации высшего образования «Российский новый университет» (105005, Москва, ул. Радио, 22); тел.: 8 (903) 245-51-37, e-mail: kryukovsky56@yandex.ru

Кузнецов Анатолий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор; Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79); тел.: 8 (812) 372-50-92, e-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Куликов Юрий Юрьевич, доктор физико-математических наук; ИПФ РАН (603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46); тел.: 8 (951) 909-43-46, e-mail: yuyukul@appl.sci-nnov.ru

Куповых Геннадий Владимирович, доктор физико-математических наук; Южный федеральный университет (347900, ГСП 17-А, Таганрог, Некрасовский пер., 44); тел.: 8 (928) 954-36-42, e-mail: kupovykh@sfedu.ru

Кутуза Борис Георгиевич, доктор физико-математических наук; Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН (125009, Москва, ул. Моховая, 11, к.7); тел.: 8 (916) 615-33-21, e-mail: kutuza@cplire.ru

Летучий Юрий Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 927-51-85.

Маков Александр Борисович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Нагорский Пётр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор; ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (634021, Томск, пр. Академический, 10/3); тел.: 8 (3822) 49-15-65, e-mail: nprn_sta@mail.ru

Новиков Александр Валерьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 760-25-49, e-mail: salska@mail.ru

Петроченко Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 764-42-70, e-mail: vmpetrochenko@mail.ru

Степанов Валерий Викторович, доктор технических наук, доцент; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); тел.: 8 (812) 337-31-14.

Чёрный Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-74, e-mail: vka@mil.ru