

**Труды Военно-космической
академии имени А.Ф. Можайского**
Научное рецензируемое издание
Выходит с 1942 года

Выпуск 662
Проблемы военно-
прикладной геофизики
и контроля состояния
природной среды

2018 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
доктор техн. наук, профессор **М.М. Пеньков**

Члены редакционного совета:

С.В. Буг – заместитель начальника Михайловской военной артиллерийской академии
по учебной и научной работе *доктор пед. наук, проф.*;

В.П. Гаенко – главный научный сотрудник НИЦ БТС 12 ЦНИИ МО РФ
доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники;

А.М. Гончаров – заместитель начальника Военной академии воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова по учебной и научной работе *доктор воен. наук, проф.*;

М.А. Еремеев – начальник управления в/ч 74455 *доктор техн. наук, проф.*;

А.В. Кузичкин – заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт телевидения»
по информационным технологиям *доктор техн. наук, проф.*;

Б.В. Соколов – начальник лаборатории Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ*;

К.Г. Ставров – начальник научно-исследовательского океанографического центра
Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института *доктор техн. наук, проф.*;

С.В. Чварков – заместитель начальника Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил
Российской Федерации по научной работе *доктор воен. наук, проф.*

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 **С.Г. Алёхин**, *кандидат техн. наук, доц.*;

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

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.Ю. Еремеев, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Замарин**, *доктор техн. наук, проф.*;

В.Н. Калинин, *доктор техн. 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. Кунгурова**, *доктор пед. наук, доц.*;

А.Г. Ломако, *доктор техн. наук, проф.*; **Г.Н. Мальцев**, *доктор техн. наук, проф.*;

Ю.С. Мануйлов, *доктор техн. наук, проф.*; **Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук*;

А.В. Паршуткин, *доктор техн. наук, проф.*; **Н.А. Репях**, *кандидат филос. наук, доц.*;

А.В. Харченко, *доктор техн. наук, доц.*; **К.Ю. Цветков**, *доктор техн. наук, проф.*;

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

ISSN 2218-5429

© Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2018

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)

Ответственный за выпуск:
начальник РИО **С.В. Чернышев**
Выпускающий редактор: *А.В. Головина*
Технический редактор
и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*
Техническая поддержка:
А.С. Тимощук

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

Не допускается воспроизведение текста издания любым механическим
или электронным способом, включая информационные базы данных
и системы, без письменного разрешения издателя

Подписано к печ. 31.07.2018.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 69,00. Уч.-изд. л. 34,00
Тираж 50 экз. Заказ 3664/111.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Андрианов И.Н., Григорьев А.Н., Дмитриков Г.Г., Зайцев В.В., Чичкова Е.Ф.</i> Процедуры анализа пространственного распределения облачности в составе технологии формирования актуальных базовых геоданных.....	7
<i>Антонов С.В., Бычков А.А., Сергеев Б.Н., Частухин А.В., Щукин Г.Г.</i> Теоретическое обоснование применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на переохлажденные туманы	13
<i>Артюшина А.В., Журавлёва Т.Б., Насртдинов И.М.</i> Результаты имитационного моделирования полей яркости неоднородной облачности с использованием программно-алгоритмического комплекса MATHART	18
<i>Ашабоков Б.А., Кешева Л.А., Крученицкий Г.М., Ташилова А.А., Шокуев Р.А.</i> Моделирование сезонной и долговременной изменчивости снежного покрова Южного федерального округа России.....	22
<i>Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С.</i> Численное моделирование радиосигнала в анизотропной среде с учетом отклоняющего поглощения методом бихарактеристик.....	26
<i>Дробашевская Е.А., Погорельцев А.И., Смышляев С.П.</i> Реакция внетропической стратосферы на события Эль-Ниньо Южного Колебания во время весенней перестройки циркуляции.....	33
<i>Клово А.Г., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Тимошенко Д.В.</i> Моделирование глобальных вариаций электрического поля в приземной атмосфере.....	37
<i>Костромитинов А.В., Рудь М.Ю.</i> Модель представления облачности циклона на основе теоретико-множественного подхода к описанию структуры данных космических аппаратов гидрометеорологического назначения.....	42
<i>Ростокин И.Н., Ростоккина Е.А., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.</i> Теоретические и экспериментальные исследования метода угломестного многочастотного микроволнового зондирования атмосферы при компенсации влияния фонового излучения.....	48

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ

<i>Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болдырев А.С., Кузьмин В.А.</i> Исследование условий развития грозных явлений и разработка рекомендаций по обеспечению безопасности полетов авиации.....	54
<i>Бейтуганов М.Н., Машуков Х.Х., Пивкин А.Н., Тлеужева М.Х.</i> Результаты инициирования искусственных молниевых разрядов металлизированными электропроводящими нитями.....	58
<i>Веснин А.М., Воейков С.В., Киселёв А.В., Котович Г.В., Куркин В.И., Мыльникова А.А., Ойнац А.В., Чистякова Л.В., Ясюкевич Ю.В.</i> Возможности приемников сигналов	

глобальных навигационных спутниковых систем для оперативного мониторинга радиоканала: проблемы и перспективы	63
<i>Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е., Терещенко Е.Д., Терещенко П.Е.</i> Влияние ионосферы в ближней зоне на поляризационные характеристики магнитного поля в диапазоне частот 0,2–200 Гц	68
<i>Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Журавлёв С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю., Романов И.В., Филиппов М.Ю., Хотенко Е.Н., Шувалов В.А.</i> Внешнее и трансionoсферное радиозондирование в Арктике при наличии нескольких бортовых ионозондов на разновысоких орбитах	73
<i>Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В.</i> Потoki авроральных электронов в высокоширотной атмосфере: диагностика по оптическим наблюдениям	78
<i>Егоров В.В., Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В.</i> Особенности возбуждения волновода Земля-ионосфера расположенным в неоднородной магнитоактивной ионосфере низкочастотным источником	82
<i>Желавский С.А., Коберник Д.А., Лебедев Н.В., Назаров С.А., Никольский В.А., Руденко В.В.</i> Влияние возмущений концентрации заряженных частиц на распространение сверхширокополосного электромагнитного сигнала в ионосферной плазме	87

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Аджиев А.Х., Готюр И.А., Кононов И.И., Коровин Е.А., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г.</i> Заблаговременное предупреждение о молниевых разрядах типа облако-земля на основе совместного использования данных грозопеленгационной сети и датчика напряженности электрического поля	92
<i>Беккиев К.М., Шаповалов А.В.</i> Расчеты по исследованию ослабления лазерного излучения ИК диапазона в облачной среде	97
<i>Брюханов И.Д.</i> Проблема интерпретации данных поляризационного лазерного зондирования конденсационных следов самолетов: оценка метеопараметров	102
<i>Брюханов И.Д., Зуев С.В., Самохвалов И.В.</i> Результаты экспериментальных исследований микрофизических свойств перистых облаков и потоков солнечной радиации у земной поверхности	107
<i>Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Матвиенко Г.Г., Морозов А.М.</i> О некоторых результатах наблюдений неба на панорамно-оптической станции «TOMSKY»	112
<i>Григорьева О.В., Кудро Д.В., Саидов А.Г.</i> Алгоритм обработки гиперспектральных данных на основе нечеткого множества кластеров в задаче классификации растительных сообществ	117
<i>Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.</i> О возможности измерения сдвига ветра по направлению в доплеровском метеорологическом радиолокаторе	124
<i>Доронин А.П., Тимощук А.С., Шабалин П.В.</i> Результаты исследования метеорологических условий формирования высоких уровней загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге по данным за 2017 год	129
<i>Ильин М.Ю., Ковалёв В.С., Коняев М.А.</i> Сравнительный анализ результатов измерения профиля ветра, полученных методом аэрологического и дистанционного зондирования	135

<i>Иннокентьев Д.Е., Козлов В.И., Кононова Н.К., Тарабукина Л.Д.</i> Согласованные межгодовые колебания грозовой активности в двух регионах Северной Азии и циркуляция нижней атмосферы в 2009–2016 годах.....	141
<i>Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.</i> Содарные исследования пространственно-временной динамики нижнего слоя атмосферы	146
<i>Краснов В.М., Кулешов Ю.В.</i> Выбор начальной формы акустического импульса точечного источника при интерпретации данных системы мониторинга опасных явлений.....	152
<i>Крученицкий Г.М., Статников К.А.</i> Эволюция вертикального распределения озона и температуры над Южным полюсом.....	157
<i>Куликов Ю.Ю., Поберовский А.В., Рыскин В.Г., Юшков В.А.</i> Влияние внезапных стратосферных потеплений на вертикальную структуру озона средней атмосферы в полярных широтах Арктики	162
<i>Куркин В.И., Науменко А.А., Подлесный А.В.,</i> Мониторинг ионосферы с использованием многофункционального ионозонда с линейной частотной модуляцией сигнала Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук	167
<i>Лопуха В.О., Федосеева Н.В.</i> Анализ облачности мезомасштабных полярных вихрей по мультиспектральным спутниковым данным.....	172
<i>Петроченко В.М., Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г.</i> Использование атмосферного электрического поля при решении прикладных геофизических задач.....	176

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

<i>Асмус В.В., Абросимов Н.И., Бурцева Т.Н., Верятин В.Ю., Иоффе Г.М., Кровотынцев В.А., Милехин О.Е., Новикова О.Г., Пустынский И.С., Соловьев В.И., Соловьева И.А.</i> Использование спутниковых данных для решения задач гидрометеобеспечения.....	181
<i>Готюр И.А., Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Коровин Е.А., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Чёрный С.Э., Щукин Г.Г.</i> Состояние и перспективы создания геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.....	186
<i>Григорьева О.В., Жуков Д.В.; Марков А.В., Мочалов В.Ф.</i> Возможности совершенствования системы производственного экологического контроля акваторий в зонах ответственности вооруженных сил при использовании данных аэрокосмической съемки.....	190
<i>Доронин А.П., Козлова Н.А., Петроченко В.М., Толстоброва Н.Б.</i> Метод локализации выбросов вредных веществ в местах крупных аварий и пожаров в населенных пунктах с помощью искусственных облаков и туманов.....	196
<i>Дроздов А.Е., Жильцов Н.Н., Свиридов В.П.</i> Автономные комплексы контактных измерений океанографических параметров для решения задач оперативной океанологии.....	201
<i>Ефременко А.Н., Моисеева Н.О., Чёрный В.В.</i> Метод автоматизированного контроля дождевых паводков в интересах гидрометеорологического обеспечения войск.....	206

<i>Жохова Д.А., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В.</i> Случай зимней конвекции по данным ATOVS.....	211
<i>Жуков В.Ю., Рыков М.С., Суворов С.С., Шукин Г.Г.</i> Оценивание интенсивности осадков с помощью многопараметрического метеорологического радиолокатора	215
<i>Кирич Д.В., Крутиков Н.О., Лукьянов А.Н., Струнин А.М., Струнин М.А.</i> Результаты сравнительного анализа распространения аэрозольных примесей в атмосфере регионов Арктики и Московской области по данным самолетных исследований в 2014–2015 годах.....	219
<i>Летучий Ю.А.</i> Оценивание экологической обстановки на объектах Вооруженных сил Российской Федерации.....	224
<i>Летучий Ю.А., Новиков А.В., Тимощук А.С., Шабалин П.В.</i> Показатели экологической эффективности деятельности воинских частей и организаций Вооруженных сил Российской Федерации	230
<i>Удриш В.В.</i> Технология подготовки специализированной климатической информации для гидрометеорологического обеспечения Вооруженных сил на базе программно-технического комплекса Автограф-климат	235
<i>Успенский А.Б.</i> Развитие и применение отечественных спутниковых систем дистанционного зондирования атмосферы	241
Рефераты статей.....	246
Сведения об авторах.....	258
Сведения о рецензентах.....	272

И.Н. Андрианов*;

А.Н. Григорьев*;

доктор техн. наук;

Г.Г. Дмитриков*;

В.В. Зайцев**;

кандидат техн. наук;

Е.Ф. Чичкова**;

кандидат геогр. наук

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

**ЦКУ «КосмоИнформ-Центр» ГУАП, г. Санкт-Петербург

ПРОЦЕДУРЫ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ АКТУАЛЬНЫХ БАЗОВЫХ ГЕОДАНЫХ

Рассматривается проблемный вопрос построения актуальных базовых пространственных данных на основе снимков, получаемых с борта космического аппарата за ограниченные интервалы времени. Проблема состоит в необходимости выполнения анализа сложного пространственного распределения облачности. Предложено использовать маски облачности, на основе которых выполняются разработанные процедуры пространственного анализа распределения облачности. Указанные процедуры позволяют оценить возможность получения качественного результата на предварительных этапах формирования актуальных базовых пространственных данных и выделить безоблачные участки на исходных изображениях. Представлено общее описание модернизированной технологии формирования базовых пространственных данных, и показан пример ее использования для решения задачи регионального уровня.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, многоспектральная съемка, геоинформационная система, базовые пространственные данные, маска облачности.

ВВЕДЕНИЕ

В информационных системах общего и специального назначения, оперирующих пространственными данными [1], в качестве основы используются базовые пространственные данные (БПД), типовой состав которых включает цифровые геопривязанные изображения поверхности Земли [2]. Указанные изображения (геоданные) могут формироваться в результате обработки данных многоспектральной съемки, выполняемой с борта космического аппарата (КА), и, как правило, представляют местность в естественных цветах. В информационных системах глобального, государственного и регионального уровней пространственный охват территории существенно превосходит размеры отдельного снимка на местности. При этом обобщенные типовые требования к качеству растровых БПД определяют целесообразность использования исходных снимков сверхвысокого, высокого и среднего пространственного разрешения. В силу этого тема исследований, посвященных решению задач по формированию БПД на основе материалов съемки с борта КА, становится все более актуальной.

Растровые БПД должны характеризоваться полнотой [2], что обуславливает при формировании БПД необходимость минимизации доли изображения облачности, присутствующего на исходных снимках. Традиционная технология формирования БПД по снимкам, получаемым из архивных банков данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), основывается на отборе изображений, наиболее качественных в изобразительном отношении (характеризующихся малыми показателями покрытия территории облачностью – с долей проективного покрытия не более 15–20%). Пространственное распределение облачности анализируется оператором, который выполняет манипуляции по фрагментированию и комбинированию исходных снимков для устранения изображений облачности. Негативные эффекты от примене-

ния указанного подхода состоят в увеличении ресурсоемкости процесса получения БПД и в нарушении временной однородности результирующих данных в силу использования ретроспективных наборов снимков, сформированных в течение значительных (многолетних) интервалов времени. На практике итоговые БПД формируются из тех изображений, для которых разброс дат их получения может составлять несколько лет.

Нарушение временной однородности явно наблюдается при изучении БПД в широко используемых картографических интернет-сервисах (Яндекс-Карты, Google Maps, Bing Maps и др.). При этом решение отдельных прикладных задач в областях государственного, муниципального и корпоративного управления, рационального природопользования, техногенной и экологической безопасности основывается на актуальных БПД, характеризующихся высокой временной однородностью.

Цель настоящей работы состоит в усовершенствовании существующей технологии формирования БПД за счет разработки и внедрения процедур автоматизированного анализа пространственного распределения облачности, обеспечивающих использование снимков с высокой долей покрытия облачностью (более 20%).

ПОДХОД К АНАЛИЗУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ НА СНИМКЕ

В рамках известных технологий формирования растровых БПД устранение изображения облачности основывается на визуальном анализе, выполняемом оператором с выделением «безоблачных» участков на исследуемых изображениях. Причем для обработки пространственных данных используется специальное программное обеспечение систем комплексной обработки данных ДЗЗ и геоинформационных систем [3].

В случае использования снимков, полученных на заданный район в течение определенного промежутка времени, например, за отдельный сезон года, могут иметь место условия, при которых возникает необходимость обработки изображений с разным значением показателя покрытия облачностью. При этом облачность представляет собой оптическую помеху со случайным пространственным распределением. Существующий опыт показывает, что структура изображения облачности в конкретных случаях съемки с борта КА может характеризоваться разными степенями сложности в зависимости от синоптической ситуации.

Наличие фронтальной облачности, которая представляет собой плотные многослойные массивы слоистых и перистых облаков, допустимо на краевых участках, пригодных для обработки снимков. Кучевые облака в средних широтах позволяют работать с подстилающей поверхностью только в утреннее время при начале развития процессов внутримассовой конвекции. При развитой конвекции и появлении кучево-дождевых облаков с условным радиусом более 10 км в вечернее время суток снимки, как правило, не приемлемы для обработки. Кучево-дождевые облака в средних широтах развиваются по вертикали до высоты 12–16 км и отбрасывают протяженные тени, что также сокращает процент пригодной для обработки территории на снимках.

Примеры реальных изображений с облачностью, полученных в течение одного летнего сезона 2017 года в рамках космической программы ДЗЗ Landsat-8, представлены на рис. 1,а–в. Соответственно доля покрытия подстилающей поверхности облачностью составляет приблизительно 10, 20 и 30%. На всех изображениях присутствует кучевая облачность. На рис. 1,б по центру снимка грядами расположены высококучевые облака. На рис. 1,в мощные кучевые облака расположены в виде кластерных групп, а кучево-дождевые имеют перистую верхушку и выметы перистых облаков. Это пример вечернего развития конвективных облаков над сушей, которые экранируют поверхность суши, но позволяют работать с водной поверхностью при формировании БПД в данном регионе.

Для автоматизации процедур формирования БПД предлагается использовать пространственные данные – маску облачности, в явном виде описывающую распределение облачности на соответствующем снимке. В общем случае маска облачности представляет собой бинарный тематический растр, значения элементов которого соответствуют, например, двум классам, а именно: значение «1» – «облачность присутствует в элементе пространственного разрешения», значение «0» – «облачность отсутствует в элементе пространственного разрешения». Примеры изображений соответствующих масок облачности представлены на рис. 1, г–е.

Маски облачности могут формироваться по исходным изображениям с использованием фрактальных преобразований, нейронных сетей и методов обработки многоспектральных снимков. В частности, возможность картографирования облачности на основе многоспектральных снимков, полученных отечественными космическими средствами ДЗЗ, отмечается в работе [4]. Разработки методов построения масок облачности в России ведутся сотрудниками ВКА имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Института космических исследований РАН, Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН и других организаций. В работах [5, 6] представлены общие положения по детектированию облачности на основе обработки многоспектральных данных и примеры практического использования масок облачности при решении прикладных задач.

Таким образом, предлагается наряду с исходными изображениями подстилающей поверхности, предназначенными для формирования БПД, использовать соответствующие им маски облачности. Свойства масок облачности позволяют повысить степень автоматизации процедур для анализа качества исходных изображений, а также использовать снимки с высоким показателем покрытия и сложным распределением облачности, обработка которых визуаль-но-инструментальным методом является в большей степени трудоемкой.

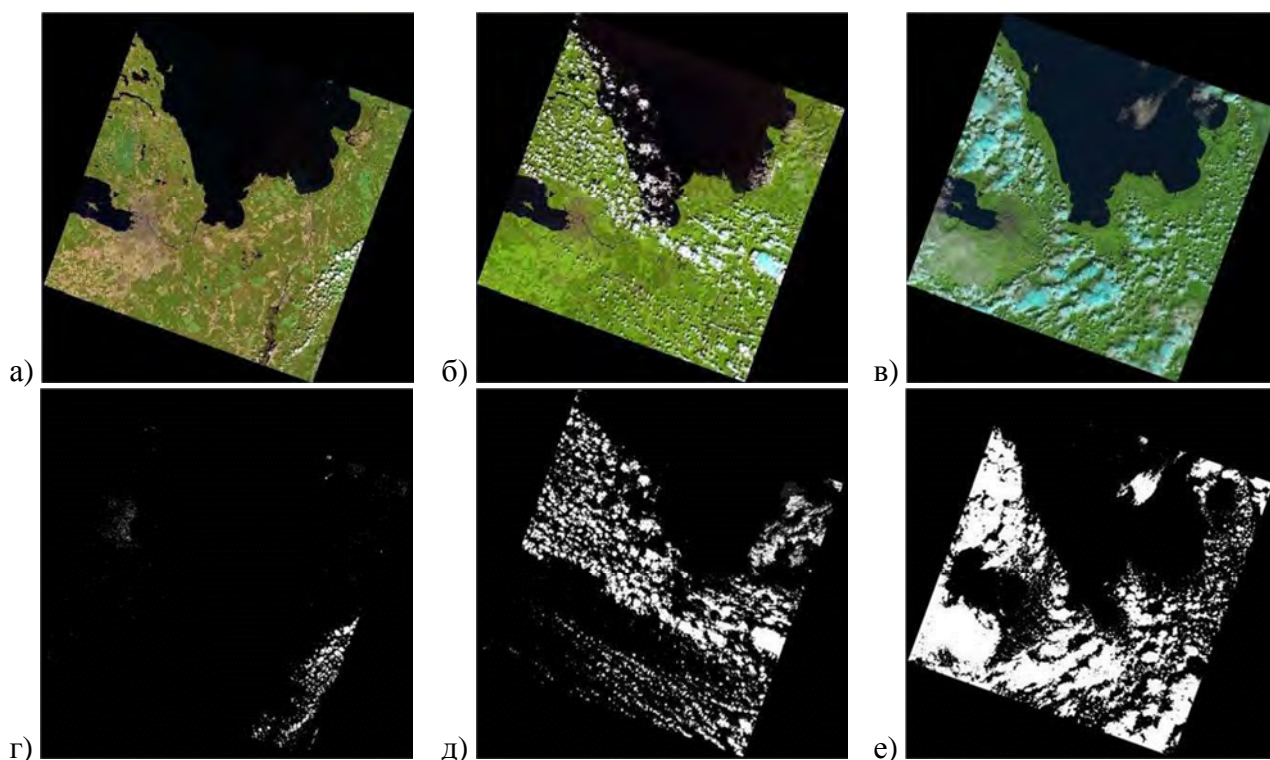


Рис. 1. Примеры данных многоспектральной съемки (а–в), зарегистрированных в мае, июне и июле 2017 года, и соответствующих масок облачности (г–е)

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА МАСОК ОБЛАЧНОСТИ

Пусть для формирования БПД имеется A многоспектральных снимков I_a , для которых $a = 1(1)A$. Отдельный многоспектральный снимок I_a при допущении, что все A снимков идентичны по объему и спектральным свойствам, может быть представлен в виде трехмерного массива данных

$$I_{a,[M,N,L]} = \left\| \left\| i_{a,m,n,l} \right\| \right\|_{M,N,L}, \quad m = 1(1)M, \quad n = 1(1)N, \quad l = 1(1)L,$$

где M, N, L – соответственно число строк, столбцов и спектральных каналов снимка I_a .

Для каждого снимка I_a известны параметры и функция пространственной привязки F^S , позволяющие представить их элементы в общей плоской прямоугольной системе пространственных координат (x, y) , следовательно,

$$i_{a,m,n,l} \xrightarrow{F_a^S} i_{a,x,y,l}, \quad x \in (x', x''), \quad y \in (y', y'').$$

Диапазоны изменения координат (x', x'') , (y', y'') в упрощенном виде определяют границы заданного района, а также размер раstra БПД D в элементах пространственного разрешения. Для заданного района в естественных цветах (RED, GREEN, BLUE, поэтому $l = 3$) на основе обобщенной функции пространственно-спектральной селекции F^{RGB} из множества исходных снимков $I_{\{A\}}$ формируются БПД D . Тогда

$$\left\langle i_{a,x,y,l} \right\rangle_A \xrightarrow{F^{RGB}} d_{x,y,3}, \quad D_{[\Delta x, \Delta y, 3]} = \left\| \left\| d_{x,y,3} \right\| \right\|_{\Delta x, \Delta y, 3}, \quad \Delta x = x'' - x', \quad \Delta y = y'' - y', \quad x = 1(1)\Delta x, \quad y = 1(1)\Delta y.$$

Параметры многоспектрального снимка I_a позволяют получить соответствующую маску облачности C_a с использованием известной функции детектирования облачности в элементе снимка F^C и выполнить его пространственную привязку с использованием функции F^S в виде

$$I_{a,[M,N,L]} \xrightarrow{F_a^C} C_{a,[M,N]}, \quad C_{a,[M,N]} = \left\| \left\| c_{a,m,n} \right\| \right\|_{M,N}, \quad c_{a,m,n} = \begin{cases} 1, & \because F_a^C = TRUE \\ 0, & \because F_a^C = FALSE \end{cases}, \quad c_{a,m,n} \xrightarrow{F_a^S} c_{a,x,y}.$$

Анализ возможности отображения элемента пространственного разрешения d с координатами (x, y) в формируемых БПД на основе хотя бы одного исходного «безоблачного» элемента выполняется с использованием операции A -операндной (A -нарной) конъюнкции, что обеспечивает построение результирующей маски облачности $C_{[\Delta x, \Delta y]}$ для БПД

$$c_{x,y} = c_{1,x,y} \wedge c_{2,x,y} \wedge \dots \wedge c_{a,x,y} \wedge \dots \wedge c_{A-1,x,y} \wedge c_{A,x,y}, \quad C_{[\Delta x, \Delta y]} = \left\| \left\| c_{x,y} \right\| \right\|_{\Delta x, \Delta y}.$$

При $c_{x,y} = 0$ существует возможность получить элемент БПД $d_{x,y,3}$ на основе одного или более исходных изображений I_a , а при $c_{x,y} = 1$ имеет место присутствие изображения облачности в элементе с координатами (x, y) на всех исходных снимках I_a . Для априорного оценивания качества формируемых БПД вычисляется показатель покрытия облачностью C_D :

$$C_D = \sum_{x=x'}^{x''} \sum_{y=y'}^{y''} c_{x,y} / (\Delta x \cdot \Delta y).$$

ОБОБЩЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ БПД И ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТА ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

На основании выполненных исследований предлагается технология формирования БПД, этапы которой включают следующие обобщенные процедуры.

1. Определение исходных требований к БПД по актуальности, по пространственному охвату (x', x'') , (y', y'') и пространственному разрешению.
2. Отбор исходных снимков I_a на основе сформулированных требований.
3. Расчет масок облачности C_a .

4. Определение «безоблачных» зон снимков I_a на основе масок облачности C_a .
5. Анализ распределения облачности на основе A -операндной конъюнкции элементов $c_{x,y}$.
6. Построение результирующей маски $C_{[\Delta x, \Delta y]}$.
7. Априорное оценивание качества формируемых БПД (вычисление C_D).
8. Определение смежных фрагментов снимков I_a на основе выделенных «безоблачных» зон, предназначенных для формирования непрерывных БПД по заданному пространственному охвату (x', x'') , (y', y'') .
9. Яркостная коррекция (выравнивание яркости) фрагментов снимков I_a с целью улучшения изобразительного качества формируемых БПД.
10. Объединение фрагментов снимков I_a в единое изображение (построение мозаики снимков), соответствующее БПД.

Процедуры 1, 2, 8–10 являются типовыми для технологии формирования БПД. В свою очередь, разработанные процедуры 3–7 обеспечивают модификацию указанной технологии в части автоматизации анализа пространственного распределения облачности по исходным снимкам. Кроме того, на уровне процедуры 7 имеется возможность оценить пригодность формируемых БПД и скорректировать (дополнить) состав исходных снимков для минимизации показателя C_D .

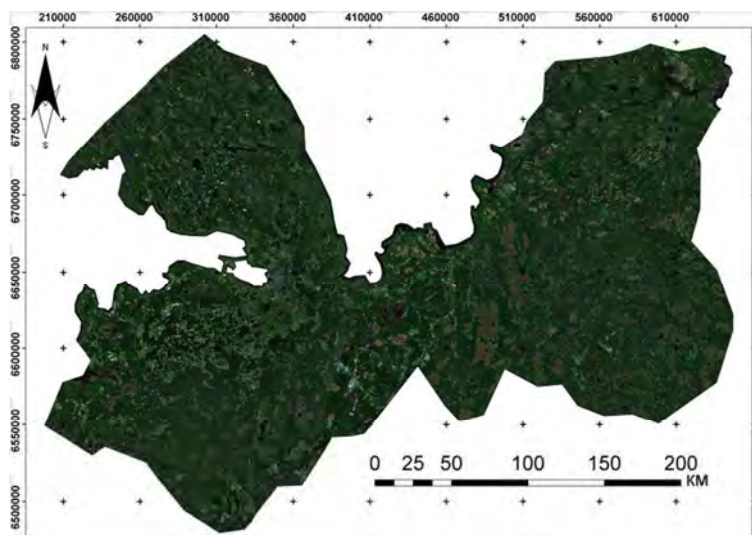


Рис.2. Изображение БПД среднего пространственного разрешения

На основе указанной технологии реализован контрольный пример по формированию актуальных БПД для территории города Санкт-Петербург и Ленинградской области. Используются многоспектральные снимки среднего пространственного разрешения, зарегистрированные в течение периода времени июнь–сентябрь 2017 года. Обзорное изображение полученных БПД представлено на рис. 2. В результатах исследования доля неустранимого изображения облачности, по своему качеству затрудняющего визуальное дешифрирование объектов на поверхности Земли, составляет не более 3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемный вопрос формирования актуальных базовых пространственных данных на основе многоспектральных снимков, получаемых за ограниченные интервалы времени с борта КА, решается за счет внедрения новых процедур для автоматизированного анализа пространственного распределения облачности. Указанные процедуры, основанные на обработке

масок облачности, обеспечивают повышение степени автоматизации этапа по определению безоблачных участков исходных изображений и позволяют априорно оценивать качество формируемых БПД по результирующему показателю покрытия облачностью. При этом обеспечивается возможность использования для формирования БПД снимков, характеризующихся высоким значением показателя покрытия облачностью (более 20%) и ее сложным распределением. В результате существующая технология формирования БПД усовершенствована путем добавления новых этапов построения масок облачности и их пространственного анализа. На основе модернизированной технологии реализован практический пример формирования БПД для территорий субъектов Российской Федерации: города Санкт-Петербург и Ленинградской области.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 50828-95. Геоинформационное картографирование. Пространственные данные, цифровые и электронные карты. Общие требования / Госстандарт России. – М., 1995. – 19 с.
2. ГОСТ Р 53339-2009. Данные пространственные базовые. Общие требования / Стандартинформ. – М., 2009. – 7 с.
3. Современные средства автоматизации обработки геопро пространственных данных / А.Н. Григорьев, А.А. Галышев, Р.Е. Куликов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2012. – Вып. 635. – С. 66–70.
4. *Лебедев А.Б., Караваев Д.М., Шукин Г.Г.* Состояние и перспективы развития метеорологической спутниковой системы // Навигация и гидрография. – 2015. – № 42. – С. 32–39.
5. *Григорьев А.Н.* Модель бортовой оценки облачности над районом съемки при дистанционном зондировании из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 4. – С. 143–150.
6. Пат. на изобретение RUS 2616719. Способ ведения спутниковой съемки при дистанционном зондировании / Григорьев А.Н., Рудь М.Ю., Шабиков Е.И. – 26.01.2015.

С.В. Антонов*;

А.А. Бычков*;

кандидат физико-математических наук;

Б.Н. Сергеев*;

кандидат физико-математических наук;

А.В. Частухин*;

Г.Г. Щукин**;

доктор физико-математических наук, профессор

* АНО «Агентство атмосферных технологий», г. Москва

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

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В РАБОТАХ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫЕ ТУМАНЫ

В статье представлены результаты теоретических расчетов, выполненных с помощью численной модели *Fog Seeding* по оценке результативности воздействия на переохлажденные туманы с помощью пиротехнических генераторов йодистого серебра (AgI) и наноразмерного льдообразующего реагента LN-212 с борта беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Приводится сравнение результатов моделирования воздействий на переохлажденный туман, выполненных с помощью БПЛА, и наземных генераторов льдообразующих аэрозолей.

Ключевые слова: работы по активному воздействию, оценка эффективности воздействия на переохлажденный туман, численная модель *Fog Seeding*.

Среди метеорологических явлений, негативно влияющих на работу воздушного, морского, железнодорожного и автомобильного транспорта, одно из первых мест занимают туманы. Так, в большинстве случаев туманы являются причиной нарушения регулярности авиарейсов. Вследствие возникновения туманов происходит значительное число аварий на автострадах, сопровождающихся человеческими жертвами [1]. Принимая во внимание практическую важность решения проблемы улучшения видимости в туманах, а также основываясь на результатах многочисленных экспериментальных и теоретических исследований за последние 60 лет, были разработаны различные методы искусственного рассеяния переохлажденного тумана.

Из числа разработанных методов наиболее широкое практическое применение в работах по искусственному рассеянию тумана нашли методы, основанные на использовании кристаллообразующих реагентов [2], реализация которых базируется на использовании льдообразующих реагентов.

К настоящему времени разработаны и прошли испытания различные способы создания в переохлажденном тумане необходимого количества ледяных кристаллов. Так, в США, Франции, Гренландии, Норвегии, Германии для рассеяния переохлажденных туманов применяются жидкий пропан и жидкая углекислота (CO₂). Российская технология искусственного рассеяния переохлажденных туманов основана на использовании в качестве реагента жидкого азота (N₂). Работы с ее применением проводились в Италии и Казахстане [2].

При проведении работ по искусственному рассеянию туманов используются наземные генераторы, осуществляющие диспергирование реагента в приземном слое атмосферы. При этом наземные генераторы можно разделить на две группы: стационарные, применяемые в основном для искусственного рассеяния туманов в аэропортах, и мобильные, применяемые в основном для рассеяния тумана вдоль автомобильных дорог. Способ рассеяния туманов с

помощью наземных генераторов имеет ряд ограничений, связанных с выбором размещения пунктов воздействия, а также невозможностью организации оперативных работ.

В настоящее время БПЛА широко используются не только в военной, но и в гражданской сфере. Современные БПЛА позволяют осуществлять подъем полезной нагрузки общим весом от 1 до 30 кг и выполнять полеты на высоте до 3–5 км от 2 до 4 ч [1]. В связи с этим возникает необходимость в проведении теоретических исследований по оценке результативности применения БПЛА в работах по искусственному рассеянию переохлажденных туманов.

Одним из инструментов, позволяющих провести оценку результативности применения различных средств воздействия, является численное моделирование. Преимущество такого моделирования – это возможность оценки на этапе планирования работ степени влияния на результативность таких факторов, как выбор способа воздействия, определение типа применяемых реагентов и технических средств с учетом конкретных синоптико-климатических и географических условий, характерных для данного района.

Для проведения теоретических исследований применения БПЛА в работах по воздействию на переохлажденный туман была использована разработанная в АНО «Агентство АТТЕХ» нестационарная трехмерная численная модель *Fog Seeding*, позволяющая производить численное моделирование активного воздействия на туман с целью его рассеяния при отрицательных температурах воздуха с помощью стационарных и мобильных азотных генераторов. Данная численная модель подробно описана в работе [4].

Для иллюстрации результатов численного моделирования воздействия на переохлажденный туман рассмотрен случай для реальных синоптических условий, наблюдавшихся в Московской области 10 февраля 2015 года в районе пересечения трассы М5 «Урал» с выездной дорогой из г. Жуковский, которые стали причиной образования сильного тумана с дальностью видимости менее 30 м, в результате чего произошло крупное ДТП.

В качестве исходной метеорологической информации использовались наземные данные о температуре, относительной влажности воздуха, направлении и скорости ветра, а также данные радиозондирования атмосферы, полученные на станциях Лыткарино и Электроугли.

С помощью модели *Fog Seeding* проведены численные эксперименты по оценке результативности воздействия на переохлажденный туман с использованием БПЛА, оснащенных пиротехническими генераторами AgI, и мобильных наземных азотных генераторов. Воздействие с помощью мобильных наземных генераторов осуществлялось при движении по дороге, а воздействие с помощью БПЛА осуществлялось на высоте 100 м по траектории, построенной с учетом скорости и направления ветра в приземном слое. Все воздействия проводились в течение одного часа. По результатам выполненного численного моделирования оценено изменение дальности видимости в районе проведения работ за время осуществления воздействия, а также в течение последующих 30 мин с интервалом в 10 мин.

В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны результаты расчета зон искусственного рассеяния тумана при проведении воздействий на переохлажденный туман. Как видно из рисунков, воздействия с помощью мобильного генератора N₂ и с помощью пиротехнических аэрозольных генераторов с борта БПЛА позволили увеличить дальность видимости на уровне поверхности земли с 30 до 2000 м. При этом площадь максимального увеличения дальности видимости при воздействиях с помощью БПЛА составила 6,9 км², а при воздействиях мобильным азотным генератором – 4,3 км². Столь высокая разница в результативности рассеяния переохлажденного тумана объясняется высотой проведения воздействия.

Следует отметить, что представленные на рис. 1 горизонтальные сечения дальности видимости подтверждают важность учета скорости и направления ветра при построении траекторий для проведения воздействий. Так, в результате воздействия с борта БПЛА по траектории, учитывающей скорость и направление ветра, представилась возможность не только увеличить дальность видимости вдоль автомобильной дороги, но и на удалении до 250 м от нее.

В качестве дополнительного исследования с помощью модели *Fog Seeding* были выполнены численные расчеты воздействий с использованием современного наноразмерного порош-

кового льдообразующего реагента LN-212. Отличительной особенностью данного реагента LN-212 является высокий показатель выхода льдообразующих частиц при сравнительно небольших расходах, что делает его применение наиболее перспективным для проведения работ по искусственному рассеянию переохлажденных туманов.

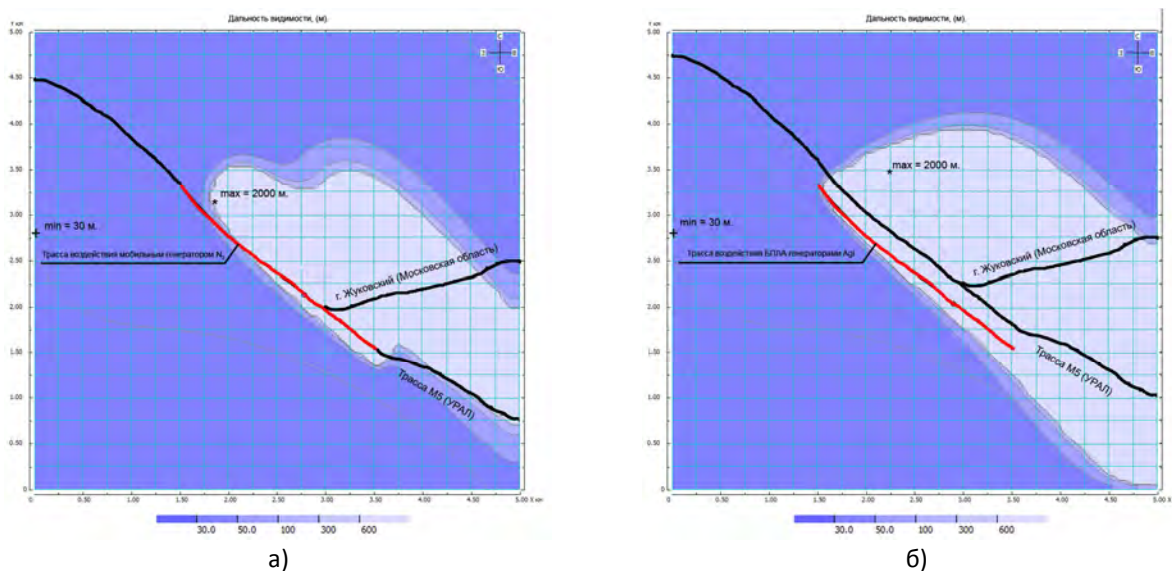


Рис. 1. Горизонтальные сечения дальности видимости, через 30 мин после начала воздействия:

а – мобильным наземным аэрозольным генератором (N_2);
б – БПЛА с пиротехническими аэрозольными генераторами AgI

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики применяемых реагентов [5].

В качестве иллюстрации на рис. 2 и 3 представлены вертикальное и горизонтальное сечения области расчета с отображением дальности видимости через 30 мин после начала воздействия, которое производилось на высоте 100 м по траектории, построенной с учетом ветрового переноса реагента. Как видно из рисунков, воздействия с помощью наноразмерного льдообразующего реагента типа LN-212 с борта БПЛА позволяет увеличить дальность видимости до 2000 м.

Таблица 1

Характеристики применяемых реагентов

Наименование реагента	Выход льдообразующих ядер с 1 г состава (при температуре минус 10°C)	Расход реагента, г/с
Пиротехнический состав АД-1	$1 \cdot 10^{13}$	0,4
Реагент LN-212	$5 \cdot 10^{14}$	0,01

Таким образом, основываясь на результатах численного моделирования воздействия на переохлажденный туман, целесообразно рассматривать возможность использования БПЛА в работах по активным воздействиям (АВ) на переохлажденные туманы.

По результатам выполненных теоретических расчетов были проведены работы по разработке технических средств воздействия на базе самолетных аэрозольных генераторов и автоматизированного дозирующего устройства, позволяющих оборудовать беспилотный летательный аппарат на базе гексакоптера DJI S-900 (рис. 4), а также выполнены летные испытания по проверке их работоспособности. Летно-технические характеристики разработанного гексакоптера приведены в табл. 2.

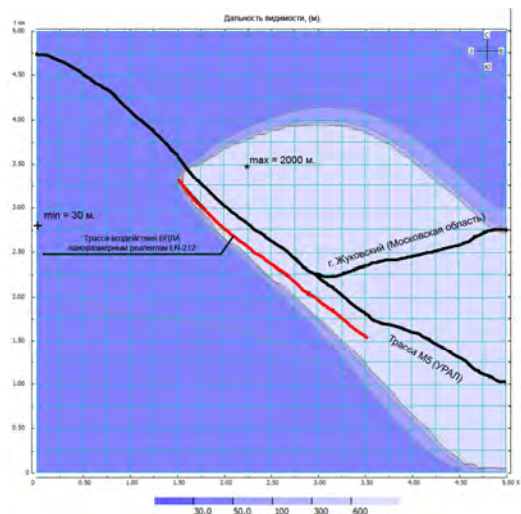


Рис. 2. Горизонтальное сечение дальности видимости, через 30 мин после начала воздействия

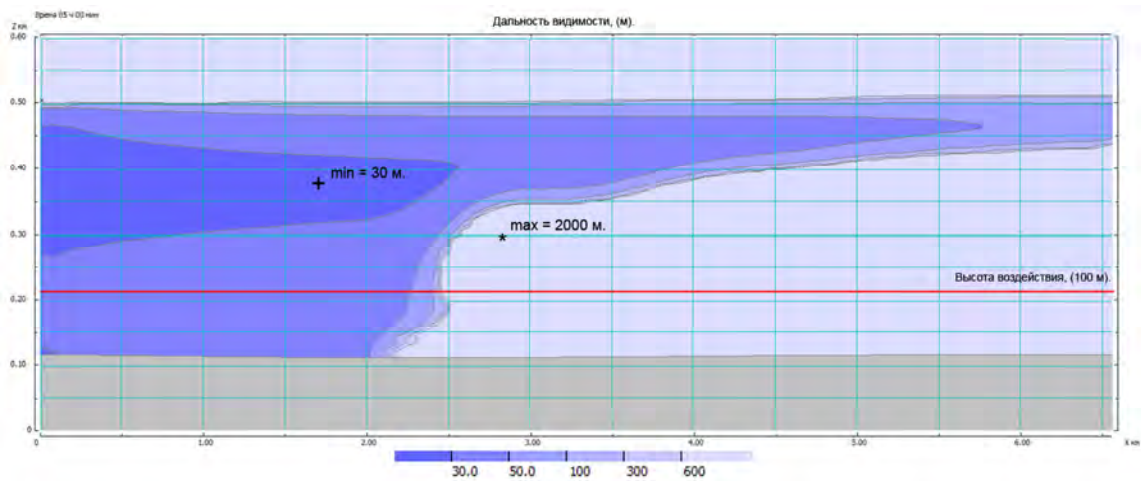


Рис. 3. Вертикальное сечение дальности видимости, через 30 мин после начала воздействия



а)



б)

Рис. 4. Внешний вид гексакоптера:
 а – с установленными средствами воздействия на базе САГ-26;
 б – с дозирующим устройством порошкообразного реагента LN-212

Таблица 2

Летно-технические характеристики гексакоптера

Параметр	Значение параметра
Высота полета, м	До 2000–2500
Горизонтальная скорость, км/ч	До 40
Вес, г	3700
Взлетный вес, г	8200
Вес полезной нагрузки, г	4500
Продолжительность полета, мин	20–30
Габаритные размеры Д × Ш × В, мм	460 × 450 × 36

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные численные эксперименты свидетельствуют о том, что воздействия на переохлажденный туман с использованием пиротехнических генераторов и современного наноразмерного льдообразующего реагента LN-212 с борта БПЛА позволяют осуществить искусственное рассеяние тумана с высокой степенью результативности. В настоящий момент в АНО «Агентство АТТЕХ» планируется организация опытных работ по воздействию на переохлажденные туманы и низкие слоистые облака с использованием созданных технических средств.

Список используемых источников

1. *Доронин А.П.* Воздействия на атмосферные процессы и явления: учеб. пособие. – СПб., 2014. – 292 с.
2. *Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г.* Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов: моногр. – СПб., 2012. – 341 с.
3. *Бычков А.А., Сергеев Б.Н., Щукин Г.Г.* Оценка эффективности искусственного увеличения осадков с использованием легких летательных аппаратов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 47. – С. 68–77.
4. *Частухин А.В., Сергеев Б.Н., Колосков Б.П.* Моделирования рассеяния переохлажденного тумана с использованием трехмерной численной модели Fog Seeding // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 49. – С. 47–57.
5. Исследование эффективности наноразмерных кристаллизующих реагентов AgI/SiO₂. / Е.В. Сосникова, Н.О. Плауде, Е.Ф. Воронини и др. // Вопросы физики и облаков: сб. статей памяти Н.О. Плауде. – С. 323–330.

А.В. Артюшина*;

Т.Б. Журавлёва*;

доктор физико-математических наук;

И.М. Насртдинов*;

кандидат физико-математических наук

*Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ЯРКОСТИ НЕОДНОРОДНОЙ ОБЛАЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА MATHART

В работе представлено краткое описание программно-алгоритмического комплекса MATHART для моделирования процесса переноса солнечного и теплового излучения в различных атмосферных условиях, в том числе – неоднородной детерминированной и стохастической облачности. Приведены примеры использования этих алгоритмов для расчета яркости отдельных облачных реализаций и усредненных по ансамблю облачных полей.

Ключевые слова: солнечное и тепловое излучение, алгоритмы метода Монте-Карло, поля яркости, детерминированная и стохастическая облачность.

ВВЕДЕНИЕ

Для более корректного решения ряда задач дистанционного зондирования атмосферы требуется вычисление пространственных, спектральных и угловых характеристик полей яркости облачной атмосферы с учетом ее пространственной неоднородности. В зависимости от конкретной проблемы существует потребность в расчетах радиационных характеристик, которые являются результатом (i) моделирования в отдельных реализациях облачных полей или (ii) осреднения по ансамблю облачных реализаций, что позволяет учесть стохастическую природу оптических и геометрических характеристик реальной облачности.

В ИОА СО РАН развивается программно-алгоритмический комплекс MATHART (**Monte Carlo Codes for Three-Dimensional Radiative Transfer**), предназначенный для моделирования потоков и полей яркости солнечного и теплового излучения в различных атмосферных условиях. Основу комплекса MATHART составляют статистические алгоритмы, созданные в 70–80 годах XX века группой под руководством Г.А. Титова [1]. В данной работе представлено краткое описание пакета MATHART, а также приведены примеры использования некоторых входящих в его состав алгоритмов.

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС MATHART

Входящие в состав комплекса MATHART алгоритмы метода Монте-Карло обеспечивают вычисление радиационных характеристик (потоки и спектрально-угловые характеристики полей солнечного и теплового излучения) как в горизонтально однородной, так и в горизонтально и вертикально неоднородной атмосфере Земли. Моделирование выполняется с учетом многократного рассеяния и поглощения облачными и аэрозольными частицами, молекулярного рассеяния и поглощения, а также отражения от подстилающей поверхности (ПП) в плоскопараллельной и сферической моделях атмосферы. Учет молекулярного поглощения реализован с использованием: 1) метода k-распределений – в солнечном диапазоне спектра и 2) метода рандомизации по частоте – в тепловом диапазоне. Подготовка необходимой спек-

троскопической информации предваряет радиационные расчеты и выполняется вне рамок данного пакета.

При переходе к радиационным расчетам в неоднородной облачности становится актуальным вопрос о методах конструирования облачных реализаций. Входящие в MATHART алгоритмы позволяют решать эту задачу с использованием двух основных классов облачных моделей.

Одной из наиболее распространенных форм задания двумерных (2D) и трехмерных (3D) облачных полей является их представление в виде совокупности прямоугольных параллелепипедов («кубиков») с пространственным разрешением от нескольких десятков до нескольких сотен метров, получаемых в рамках LES (*Large Eddy Simulation*) моделей. Надежным способом выявления ошибок и улучшения конкретных радиационных кодов, предназначенных для решения уравнения переноса излучения (УПИ) в таких сложных средах, является сопоставление результатов расчетов. Эти расчеты были получены с использованием различных методов решения УПИ или модификаций в рамках одного и того же метода, как это было сделано, например, при выполнении международного проекта *Intercomparison of 3D-Radiation Codes* (I3RC, [2]).

Другим источником для построения облачных реализаций являются стохастические конструктивные модели облаков: гауссовская, каскадная, пуассоновская и др. [1]. На сегодняшний день входящие в состав комплекса MATHART алгоритмы реализованы в рамках модели на основе пуассоновских потоков точек в пространстве. При этом облачные элементы аппроксимируются опрокинутыми усеченными параболоидами. В последние годы к разработанным ранее алгоритмам для плоскопараллельной модели атмосферы [1] добавлены новые алгоритмы, обеспечивающие учет эффектов сферичности.

Учитывая сложную структуру облачного поля и необходимость тщательного тестирования алгоритмов, для моделирования переноса солнечного излучения в 3D облачном поле было разработано несколько модификаций алгоритмов. В основе всех модификаций лежит метод сопряженных блужданий; различия состоят в способах моделирования длины свободного пробега (аналоговое моделирование, метод максимального сечения) и учета молекулярного поглощения. Вычисление интенсивности, усредненной по ансамблю облачных реализаций, выполняется на основе численного усреднения УПИ. Уменьшение трудоемкости алгоритма базируется на приеме теории методов Монте-Карло – введении дополнительной случайности («рандомизации») [1].

Одним из преимуществ пакета MATHART по отношению к разработанным ранее в других научных российских и зарубежных группах [2] является возможность учета неоднородности облаков как в отдельных реализациях, так и в усредненных по ансамблю облачных полях [3]. Реализация алгоритмов в рамках сферической модели атмосферы расширяет круг решаемых задач, в частности, за счет возможности рассмотрения схем дистанционного зондирования при больших зенитных наблюдениях и углах Солнца, в том числе – в сумеречных условиях.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСА MATHART

Проиллюстрируем возможности разработанных алгоритмов на примере расчетов спектрально-угловых характеристик полей отраженной солнечной и уходящей с верхней границы атмосферы тепловой радиации в присутствии разорванной облачности (B_{cld}). В качестве примера рассмотрим две реализации облачных полей R1 и R2 (балл облачности БО = 3) и сопоставим результаты моделирования $B_{cld}(R1)$ и $B_{cld}(R2)$ со средней интенсивностью $\langle B \rangle$ и яркостью безоблачного неба B_{clr} при зондировании в надир. Отличие выбранных реализаций состоит в том, что точка наблюдения (ТН) на поверхности Земли в одном случае

открыта для наблюдений из космоса (R1, рис.1,а), а в другом – непосредственно над ТН находится облако А (R2, рис. 1,б).

Облачные поля площадью 200 км^2 располагались в интервале высот 1–2 км над поверхностью Земли, диаметр основания облака составлял $D = 1 \text{ км}$. Оптические характеристики аэрозоля и облаков задавались на основе модели ОРАС (при $\lambda=0,55 \text{ мкм}$ коэффициент ослабления облаков и аэрозольная оптическая толщина были равны: $\sigma_{cld} = 10 \text{ км}^{-1}$, $\tau_a = 0,15$), а свойства ПП соответствовали типу поверхности «смешанный лес».

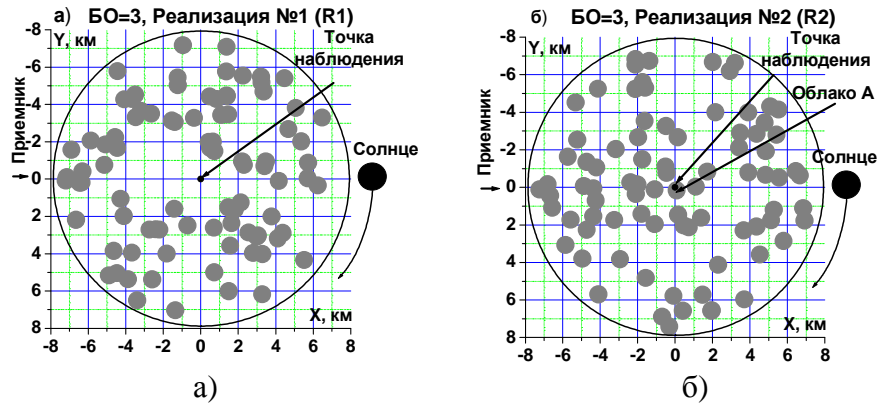


Рис.1. Проекция облачных реализаций на плоскость XOY ($BO = 3$)

Ранее нами было показано [3], что формирование яркости неба происходит под влиянием 3D эффектов изолированного облака (присутствием/отсутствием облака на линии визирования (ЛВ), затененностью ЛВ облаками/открытостью направления «на Солнце», подсветкой ЛВ отраженной от облака радиацией), а также радиационного взаимодействия – взаимного затенения и эффектов многократного рассеяния между облаками. Поскольку перечисленные факторы способствуют как уменьшению, так и увеличению яркости B_{cld} относительно B_{clr} , их проявление определяется конфигурацией облаков в конкретном поле.

Видимый диапазон. В случае, когда линия визирования свободна от облаков (реализация №1, рис. 1,а), увеличение яркости B_{cld} относительно B_{clr} может быть обусловлено дополнительным освещением ЛВ переотраженным между облаками излучением – в данной конфигурации этот эффект проявляется крайне слабо (рис. 2,а). В то же время наличие облаков в направлении «на Солнце» является причиной затенения ЛВ и ТН, а следовательно, и уменьшения яркости в определенных диапазонах азимутальных углов Солнца SAA : $B_{cld} \leq B_{clr}$.

Например, если $SZA=30^\circ$, то эффект затенения наблюдается при $25^\circ \leq SAA \leq 65^\circ$ и $120^\circ \leq SAA \leq 140^\circ$, а если $SZA=75^\circ$ – то при $25^\circ \leq SAA \leq 85^\circ$ и $110^\circ \leq SAA \leq 140^\circ$. Очевидно, что с увеличением SZA влияние облаков, расположенных достаточно далеко от ТН, может усилиться (рис. 1,а и 2,а).

Если линия визирования пересекает облако (облако А, реализация №2 на рис. 1,б), последнее играет роль сильного отражателя и яркость неба существенно возрастает относительно безоблачных условий (рис. 2,а). Влияние затенения облаками ЛВ и ТН проявляется в виде особенностей угловой зависимости B_{cld} от азимута Солнца, но оно менее значимо по сравнению с эффектом отражения от облака. Отметим, что наличие окружающих облако А элементов изменяет условия его освещенности, перекрывая доступ прямого солнечного излучения. Если при небольших зенитных углах Солнца это воздействие определяется близлежащими облаками, то при увеличении SZA возрастает роль удаленных облаков.

Тепловой диапазон. В окне прозрачности 8–13 мкм значения яркости в безоблачном небе и реализации №1 практически совпадают (рис. 2,б), так как линия визирования не пересекает облако. Спад яркости B_{cld} относительно B_{clr} наблюдается в реализации №2. Причиной этого является экранирование облаком нижних, более теплых слоев атмосферы и ТН на поверхности Земли (по аналогии со сплошным облачным слоем). В полосе сильного поглощения атмосферными газами 6–8 мкм (H_2O , CH_4 , O_2 , N_2O) яркости разорванной облачности и безоблачного неба практически неразличимы.

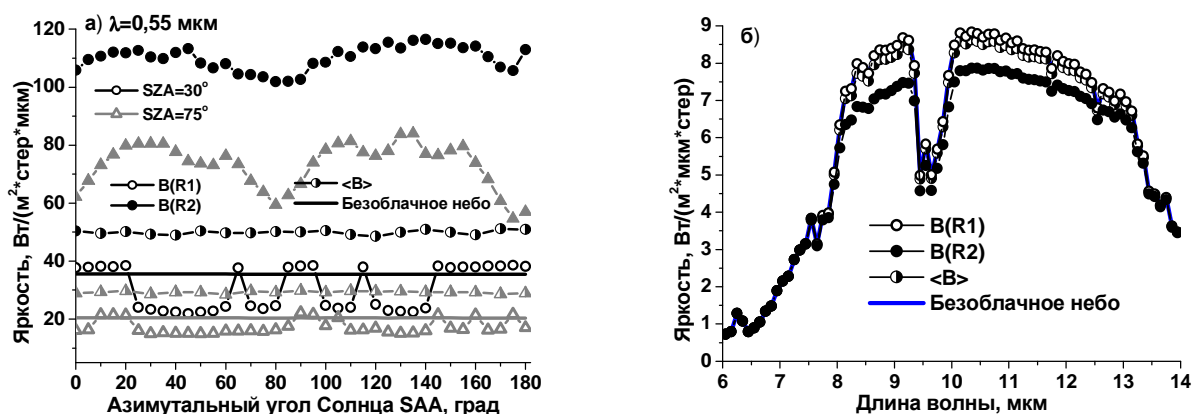


Рис.2. Яркости безоблачного неба и разорванной облачности (реализации R1 и R2, усреднение по реализациям) в спектральном интервале $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ (а) и диапазоне 6–14 мкм (б) при визировании «в надир», балле облачности «3»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Входящие в состав пакета MATHART алгоритмы могут быть использованы для решения актуальных задач дистанционного зондирования, таких как восстановление характеристик аэрозоля и облаков, улучшение интерпретации данных наземных и спутниковых наблюдений, «скрининг» облаков и др. Анализ результатов моделирования показывает, что яркость в отдельных облачных реализациях определяется, помимо 3D эффектов изолированного облака, еще и эффектами затенения и переотражения оптического излучения между облаками, расположенными преимущественно вблизи линии визирования. В солнечном диапазоне формирование яркости зависит также от конфигурации облаков в направлении «на Солнце», однако при переходе к осреднению по облачным реализациям флуктуации яркости, как функции азимутального угла Солнца, сглаживаются.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-01-00617а).

Список используемых источников

1. Зуев В.Е., Тутов Г.А. Оптика атмосферы и климат. – Томск.: Спектр ИОА СО РАН, 1996. – 271 с.
2. Cahalan R. The International Intercomparison of 3D Radiation Codes (I3RC): Bringing together the most advanced radiative transfer tools for cloudy atmospheres // Bull. of Amer. Meteor. Soc. 2005. – Vol. 86, № 9. – P. 1275–1293.
3. Журавлева Т.В., Насртдинов И.М., Русскова Т.В. Влияние 3D эффектов облаков на пространственно-угловые характеристики поля отраженной солнечной радиации // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 9. – С. 758–766.

Б.А. Ашабоков*,
 доктор физико-математических наук;
 Л.А. Кешева*,
 кандидат физико-математических наук;
 Г.М. Крученицкий**,
 доктор физико-математических наук;
 А.А. Ташилова*,
 кандидат физико-математических наук;
 Р.А. Шокуев***

* ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

** ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный

*** СУМГФ ФАКИ МФТИ, г. Долгопрудный

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ И ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РОССИИ

Проанализирована сезонная и долговременная изменчивость толщины снежного покрова для южных регионов России. Протестирована гипотеза о влиянии параметрического резонанса с минимальной частотой приливных колебаний на долговременную изменчивость толщины снежного покрова. Вычислены параметры полей климатических норм толщины снежного покрова для Юга России. Показано, что учет влияния медленных приливных колебаний на толщины снежного покрова приводит к исчезновению положительного тренда для значений этого параметра, осредненных по региону.

Ключевые слова: снежный покров, сезонная изменчивость, долговременная изменчивость, тренды, долгопериодные приливные колебания.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе проанализированы подекадно осредненные данные о толщине снежного покрова (ТСП), полученные в период 1960–2012 годов на метеостанциях Южного и Северокавказского федеральных округов России [1]. Целью работы было исследовать и параметризовать сезонную и долговременную изменчивость ТСП в регионе. Под сезонной изменчивостью мы понимаем ежегодно повторяющуюся на протяжении периода (сезона) с октября по апрель включительно составляющую, а под долговременной – вклад в процесс изменения ТСП либо тренда, либо долговременного колебания (т.е. колебания с периодом, гораздо большим одного года).

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Модели сезонной изменчивости строились как регрессионные, т.е. как набор параметров, представляющих собой коэффициенты регрессии рядов наблюдений на гармоники периода наличия снега в регионе. Параметры моделей определялись методом наименьших квадратов из соотношения

$$h_i(t) = \sum_{k=1}^7 [a_{ik} \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) + b_{ik} \sin\left(\frac{2\pi k}{T}t\right)] + a_{i0} + Rez_i(t), \quad (1)$$

где t – время в декадах, начиная с 1 октября;

$h_i(t)$ – осредненная по всему периоду наблюдений ТСП на i -й станции за декаду t ;

T – длительность (в декадах) периода наличия снежного покрова в регионе,
 $T = 21$.

Число станций в регионе (криволинейный прямоугольник в диапазоне широт $41.5-45^{\circ}\text{N}$ и долгот $39.7-48.3^{\circ}\text{E}$) составило 20.

Число гармоник в модели ограничено семью, что следует из определенных соображений: теорема Котельникова [2] требует не менее двух отсчетов на период, однако она справедлива лишь при бесконечном значении соотношения сигнал/шум. Поэтому мы тестируем гармоники, имеющие не менее трех отсчетов на период, т.е. не более высокие чем седьмая.

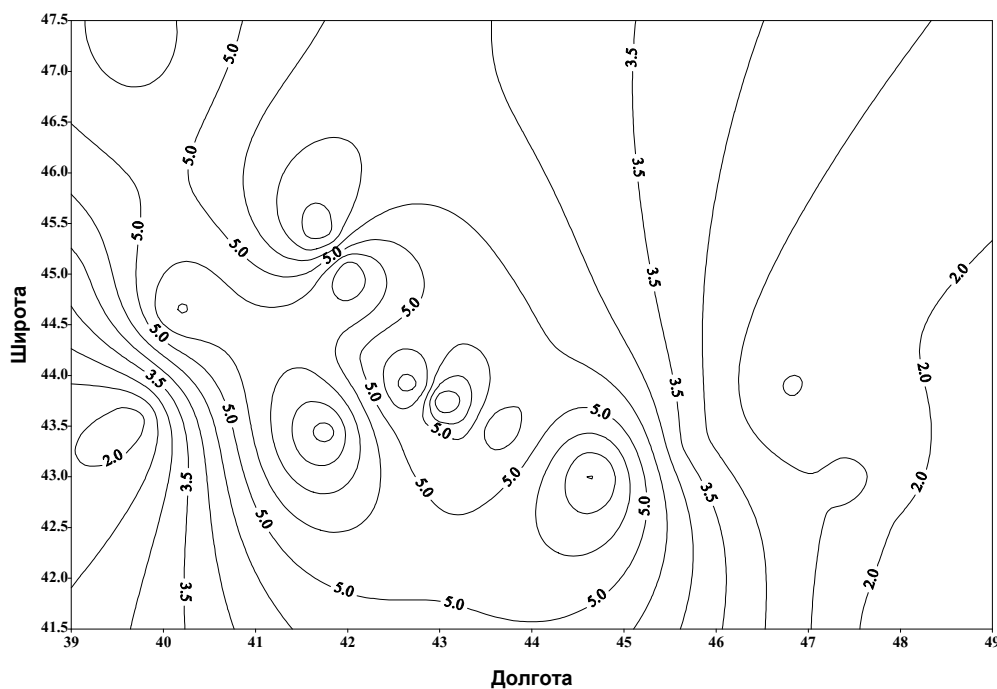


Рис.1. Распределение параметра a_0 модели сезонного хода по региону

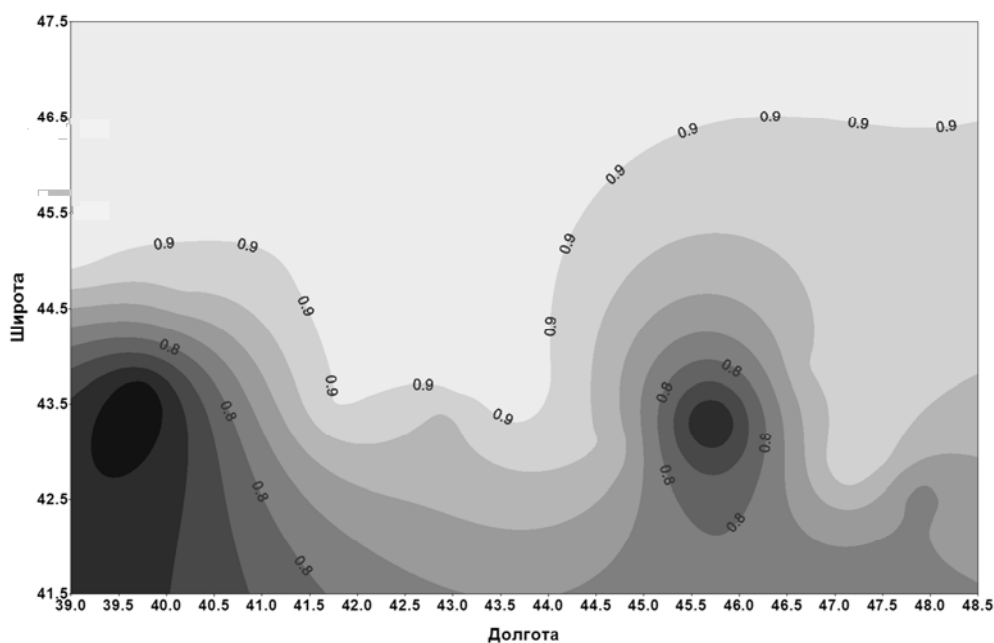


Рис.2. Распределение эффективности моделирования сезонного хода по региону

В регрессионной модели (1) значения коэффициентов a_{ik}, b_{ik} , вычисленных методом наименьших квадратов, тестировались по критерию Стьюдента [3], и те, надежность которых составляла менее 95%, полагались равными нулю. Оценивая построенные модели сезонной изменчивости, следует признать их достаточно надежными и эффективными (рис.1 и 2) для

решения ряда практических задач, в частности, таких как, например, прогнозирование урожайности или диагностика изменений чувствительности спектральных приборов космического базирования.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Приступая к анализу долговременной изменчивости, мы исходили из факта существенно негативного влияния наличия лакун в анализируемых рядах на соотношение сигнал/шум в них. Для улучшения этого соотношения в настоящей работе исследовался ряд регионально осредненных остатков сезонного хода $X_{<i>}(t)$ на долговременную изменчивость.

Первоначально для этого ряда был вычислен тренд, т.е. показатель долговременной изменчивости, сводящий ее к однонаправленным изменениям, как это должно иметь место, например, при антропогенных эффектах. Показатели вычисленного тренда приведены во втором столбце табл. 1. Несмотря на относительно невысокую эффективность, тренд является статистически значимым: значение статистики Фишера больше 8, в то время как 95%-ная надежность модели обеспечивает значение ~ 3 , а вероятность получить такой тренд случайно (статистика Стьюдента) составляет 0,4%.

Таблица 1

Показатели трендов до и после учета долгопериодных колебаний

Показатели тренда	До учета	После учета
Значение \pm погрешность, см/10 лет	0,16 \pm 0,06	0,04 \pm 0,05
Эффективность (R^2)	0,7%	0,04%
Статистика Фишера	8,2	0,4
Статистика Стьюдента	0,4%	51%

Альтернативная (по отношению к тренду) модель долговременной изменчивости ТСП в регионе строилась как регрессионная. В качестве регрессоров использовались три гармоники подбираемого периода (значительно большего чем год) и его второй обертона (для учета эффекта параметрического резонанса [4]). Построение регрессионной модели осуществлялось по формуле

$$X_{<i>}(t) = [A \cos\left(\frac{\pi k}{LT} t\right) + B \sin\left(\frac{\pi k}{LT} t\right)] + \sum_{k=1}^3 [a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{LT} t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{LT} t\right)] + A_0 + Rez_i(t), \quad (2)$$

где LT – значение подбираемого по критерию наименьших квадратов периода.

Значение величины LT подбиралось с применением надстройки SOLVER электронных таблиц Excel [5]. Это значение оказалось равным 18,8 года, что весьма близко к периоду самого медленного из приливных колебаний, наблюдаемого практически во всех геосферах [6, 7] с периодом 18,6 года. Некоторое уменьшение частоты по сравнению с ожидаемой обусловлено, по-видимому, влиянием диссипативных процессов.

Построенная модель имеет эффективность 9,8%, значение статистики Фишера 14,8, а наихудший из показателей статистики Стьюдента составляет $2 \cdot 10^{-5}$, который получен для параметрического унтертона и означает, что вероятность его случайного присутствия в модели 0,002%.

Результаты моделирования представлены на рис.3. Сравнивая эти показатели с параметрами тренда (столбец 2 табл. 1), мы видим, что по всем показателям статистической надежности колебательная модель долговременной изменчивости параметров снежного покрова существенно превосходит модель однонаправленного возрастания, соответствующую тренду. После исключения колебательной модели из остатков сезонного хода тренд «остатков» (столбец 3 табл. 1) оказывается статистически незначимым.

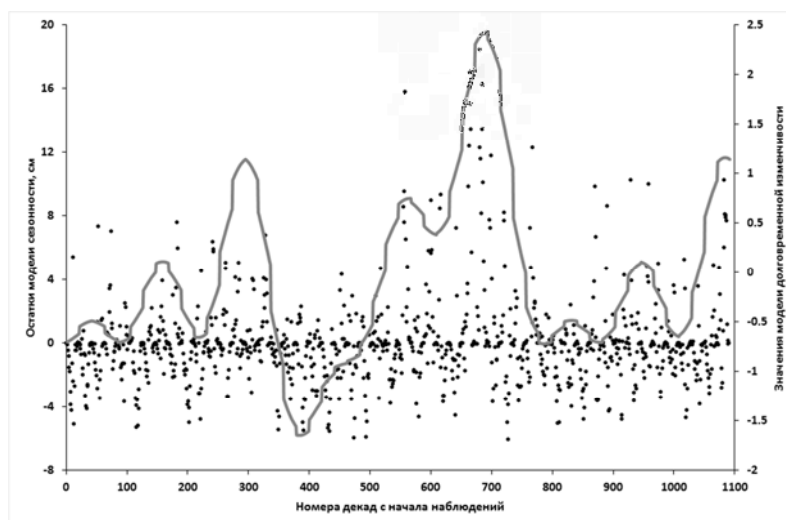


Рис.3. График региональной модели долговременной изменчивости параметров снежного покрова (точки – остатки сезонного хода, сплошная линия – модель)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ рядов наблюдений позволяет сделать следующие выводы.

Толщина снежного покрова для южных регионов России имеет ярко выраженный сезонный ход с коэффициентом детерминации не хуже 55%. Поля параметров сезонного хода являются достаточно гладкими, и их изменчивость хорошо физически обусловлена.

Модель обусловленности долговременной изменчивости толщины снежного покрова для южных регионов России медленными приливными колебаниями значительно более статистически надежна, чем модель положительного тренда, вытекающая из гипотезы о глобальном потеплении.

Практическую значимость учета наличия долговременной изменчивости ТСП подтверждает (для другого региона) анализ урожайности [8].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-05-00901а, за которую авторы выражают сердечную благодарность.

Список используемых источников

1. Структурный анализ и прогноз зимних осадков методом «Caterpillar»-SSA / А.А. Ташилова, Л.А. Кешева, С.Б. Балкароваи др. // Доклады АМАН. – 2013. – Т.15, №1.– С.106–114.
2. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – 4-е изд. – М.: ЛКИ, 2007. – С. 89.
3. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. – М.: ИЛ, 1960. – 148 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Классическая механика. – М.: Наука. Физматгиз, 1988. – С.106–111.
5. Walkenbach J. Excel 2013 Power Programming with VBA. – Wiley, 2013. – 754 p.
6. Марчук Г.И., Каган Б.А. Динамика океанских приливов. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 359 с.
7. Kruchenitsky G.M., Statnikov K.A. Statistical Modelling of Global Tectonic Activity and some Physical Consequences of its Results, Journal of Systemics // Cybernetics and Informatics. –Vol. 13, #1. – 2015. – P. 51–55.
8. Динамика урожайности зерновых. – URL: <http://vuz-24.ru/nex/vuz-161345.php> (дата обращения: 25.10.2017).

Ю.И. Бова*;
 А.С. Крюковский*,
доктор физико-математических наук;
 Д.С. Лукин*,
доктор физико-математических наук, профессор
 *Российский новый университет, г. Москва

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОСИГНАЛА В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ОТКЛОНЯЮЩЕГО ПОГЛОЩЕНИЯ МЕТОДОМ БИХАРАКТЕРИСТИК

Проведено численное моделирование распространения радиоволн в анизотропной ионосфере с учетом частотной модуляции и влияния частоты соударений электронов на отклоняющее поглощение. Рассмотрены проекции лучей на разные координатные плоскости: на плоскость распространения и боковую плоскость. Исследованы поглощение радиоволны, расходимость вдоль лучей и влияние этих факторов на ослабление амплитуды радиосигнала. Расчеты выполнены для дневной модели электронной концентрации высокоширотной ионосферной плазмы. Сопоставлены результаты вычислений в случае обыкновенной и необыкновенной волн.

Ключевые слова: численное моделирование, радиосигнал, анизотропная среда, ионосфера, метод бихарактеристик.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена моделированию распространения линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала в ионосферной анизотропной плазме и анализу его ослабления за счет расходимости и отклоняющего поглощения. Актуальность данной работы определена широким использованием электромагнитных волн декаметрового диапазона для обеспечения дальней радиосвязи, радионавигации, радиолокации, загоризонтного радиозондирования, а также для изучения структуры верхней атмосферы Земли – ионосферы (например, в [1–5]). В работах [6–11] нами рассмотрено распространение ЧМ излучения в ионосферной плазме, когда источник излучения расположен на поверхности Земли. Распространение ЧМ сигналов в случае изотропной ионосферной плазмы в зависимости от высоты источника излучения рассмотрено в работе [10]. Несмотря на значительный объем исследований в данной области, распространение ЛЧМ сигналов в ионосферной плазме с учетом магнитного поля Земли изучено еще недостаточно.

В данной работе особое внимание уделено исследованию ослабления радиосигнала за счет отклоняющего поглощения и расходимости на примере моделей электронной концентрации и частоты соударений электронов для высокоширотной дневной ионосферы.

Постановка задачи. Как известно [12], эффективная диэлектрическая проницаемость среды для неоднородной анизотропной ионосферы имеет вид (формула Эпплтона)

$$\varepsilon = 1 - \nu \left(1 - iZ - \frac{u \sin^2 \alpha}{2(1 - \nu - iZ)} \pm \sqrt{\frac{u^2 \sin^4 \alpha}{4(1 - \nu - iZ)^2} + u \cos^2 \alpha} \right)^{-1}. \quad (1)$$

В выражении (1) параметры ν и u являются отношениями квадрата плазменной частоты и квадрата гирочастоты к квадрату рабочей частоты соответственно [2–12]. Введем обозначения: N – величина электронной концентрации в фиксированной точке пространства, Z – отношение частоты соударений электронов ν_e к круговой рабочей частоте ω , а величина α – это угол между волновым вектором и напряженностью магнитного поля Земли

$\vec{H}_0 = (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z})$. В формуле (1) знак плюс соответствует обыкновенной волне, а знак минус – необыкновенной волне.

В приведенных ниже расчетах амплитуда магнитного поля предполагается постоянной, а ориентация напряженности магнитного поля относительно локальной системы координат задается двумя углами γ и φ :

$$H_{0x} = H_0 \cos\gamma \cos\varphi; \quad H_{0y} = H_0 \cos\gamma \sin\varphi; \quad H_{0z} = H_0 \sin\gamma.$$

В основе примененного в данной работе подхода лежат лучевые методы, являющиеся традиционными при описании процессов распространения дециметровых радиоволн в различных средах (например, в [2, 13]). При моделировании лучевых траекторий в анизотропной, неоднородной среде бихарактеристическая система уравнений с гамильтонианом

$$\Gamma = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_r(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \quad (2)$$

имеет вид [2, 11, 13]:

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = \frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{k}}; \quad \frac{d\vec{k}}{d\tau} = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{r}}; \quad \frac{dt}{d\tau} = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \omega}; \quad \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{\partial \Gamma}{\partial t}, \quad (3)$$

где \vec{r} – координаты точки наблюдения, $\vec{r} = (x, y, z)$;

\vec{k} – волновой вектор, $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$;

$\varepsilon_r(\vec{r}, \vec{k}, \omega)$ – действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости среды распространения;

t – групповое время;

τ – параметр вдоль лучевой траектории.

Для применения при численном моделировании системы (2), (3) необходимо представить диэлектрическую проницаемость (1) в виде суммы действительной и мнимой части: $\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$.

Анализируя выражение (1), находим:

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{v(z_\varepsilon + r_\varepsilon \cos\phi_\varepsilon)}{(z_\varepsilon + r_\varepsilon \cos\phi_\varepsilon)^2 + (u_\varepsilon + r_\varepsilon \sin\phi_\varepsilon)^2}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_i = \frac{v(u_\varepsilon + r_\varepsilon \sin\phi_\varepsilon)}{(z_\varepsilon + r_\varepsilon \cos\phi_\varepsilon)^2 + (u_\varepsilon + r_\varepsilon \sin\phi_\varepsilon)^2}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) введены обозначения:

$$z_\varepsilon = 1 - \frac{(1-v)u \sin^2 \alpha}{2((1-v)^2 + Z^2)}, \quad u_\varepsilon = -Z - \frac{Z u \sin^2 \alpha}{2((1-v)^2 + Z^2)}, \quad (6)$$

$$r_\varepsilon = \pm (x_\varepsilon^2 + y_\varepsilon^2)^{1/4}, \quad \phi_\varepsilon = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{x_\varepsilon}{y_\varepsilon} \right), \quad (7)$$

$$x_\varepsilon = \frac{(1-v)Z u^2 \sin^4 \alpha}{2((1-v)^2 + Z^2)^2}, \quad y_\varepsilon = u \cos^2 \alpha + \frac{((1-v)^2 - Z^2) u^2 \sin^4 \alpha}{4((1-v)^2 + Z^2)^2}. \quad (8)$$

Пусть начальный волновой вектор $\vec{k}(0)$ зависит только от угла выхода луча α_0 ($\beta_0=0$), тогда

$$k_x(0) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \cos\alpha_0 \cos\beta_0, \quad k_y(0) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \cos\alpha_0 \sin\beta_0, \quad k_z(0) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \sin\alpha_0, \quad (9)$$

источник излучения точечный, находится вне магнитоактивной плазмы и расположен в начале координат $(0,0,0)$. Величина ε_0 в выражениях (9) – это значение эффективной диэлектрической проницаемости среды в источнике излучения.

Предположим, что сигнал ЛЧМ, т.е. формула для мгновенной частоты заполнения, имеет вид [6, 8]:

$$\omega(0) = \omega_0(1 + \delta\eta), \quad t(0) = \eta; \quad \delta = \frac{2f_d}{f_0 T_u}, \quad f(t) = f_0(1 + \delta t), \quad (10)$$

$$f_0 = \omega_0 / (2\pi)$$

где η – начальное время выхода луча;

f_0 – начальная частота, Гц;

f_d – девиация частоты, Гц;

T_u – длительность импульса, с.

В данной работе были приняты следующие значения параметров: $f_0 = 2,5$ МГц, $f_d = 3,75$ МГц, $T_u = 3$ с, $\delta = 1$ с⁻¹. При этом максимальная частота равна приблизительно 10 МГц. Распространение электромагнитной волны изначально осуществляется в плоскости (x, z) .

Рассмотрена дневная модель высокоширотной ионосферной плазмы. Предполагается, что профиль электронной концентрации имеет вид, представленный на рис. 1. Профиль электронной концентрации в случае дневной ионосферы нетипичен, поскольку в максимуме слоя E электронная концентрация больше, чем в слое F. На рис. 2 показана зависимость электронной частоты соударений от высоты для дневной ионосферы. Представленные на рис. 1 и 2 профили коррелируют с данными, приведенными в [14] (80° с.ш., 30° в.д. в марте).

При вычислении применялись следующие значения параметров: $H_0 = 0,36$ Э, $\zeta = 0$, $\gamma = -135^\circ$, $\phi = 90^\circ$.

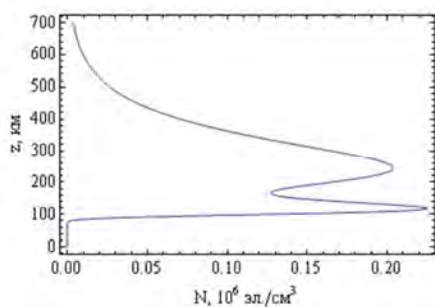


Рис.1. Зависимость электронной концентрации от высоты

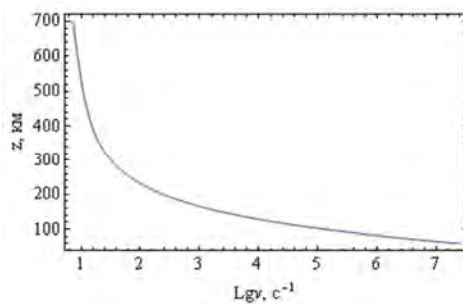


Рис.2. Зависимость электронной частоты соударений от высоты

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим графики для дневной ионосферы. На рис. 3 показана лучевая структура ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) .

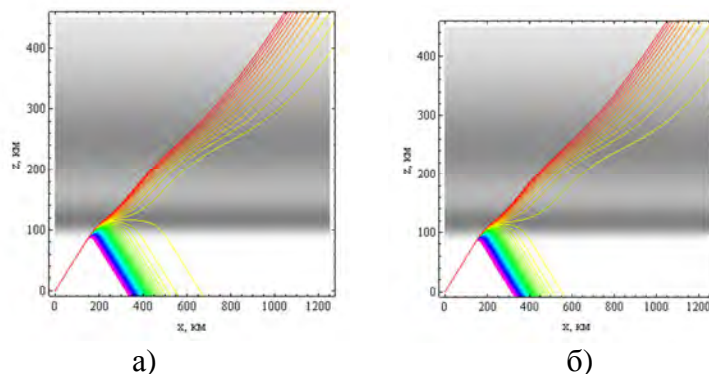


Рис.3. Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) :
а – обыкновенная волна; б – необыкновенная волна (угол выхода 30°)

Поскольку в данном случае максимум слоя E больше максимума слоя F, что является аномалией, лучи отражаются только от слоя E.

На рис. 4 показана лучевая структура ЛЧМ радиосигнала в боковой плоскости (y, z) . Видно, что отраженные лучи слабо отклоняются от первоначальной плоскости распространения. Отклонение же прошедших лучей достигает 10 и более километров.

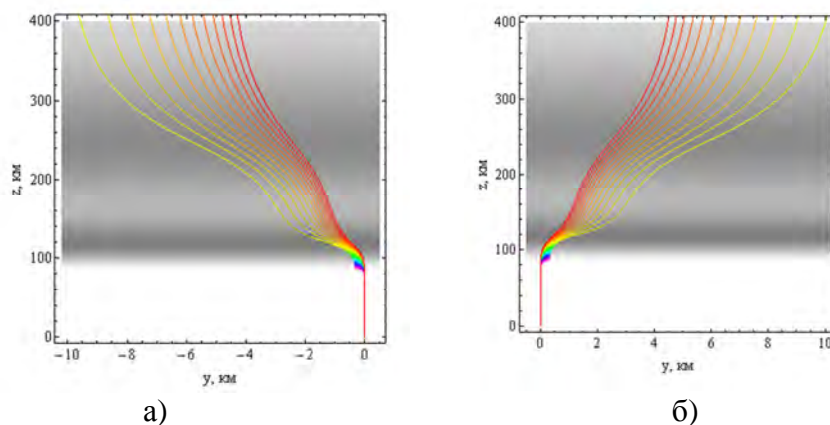


Рис.4. Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (y, z) :

а – обыкновенная волна; б – необыкновенная волна (угол выхода 30°). Дневная ионосфера

Рассмотрим поглощение вдоль траекторий. Для вычисления поглощения, связанного с частотой соударения электронов, справедлива формула

$$\frac{d\Psi}{d\tau} = -2\varepsilon_i \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (11)$$

На рис. 5 представлены зависимости от высоты поглощения Ψ (в неперках) вдоль траекторий. Следует отметить, что при малых значениях отношения эффективной частоты соударения электронов к круговой рабочей частоте ($Z \ll 1$) мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости пропорциональна произведению частоты соударений на квадрат электронной концентрации: $\varepsilon_i \sim \nu Z \sim N^2 \nu_e$. С уменьшением высоты ниже слоя E электронная концентрация падает, а частота соударений растет (см. рис. 1 и 2), поэтому наибольшее поглощение происходит вблизи нижней границы ионосферы, что и видно на рис. 5

Графики на рис. 5 строились в соответствии с формулой (11).

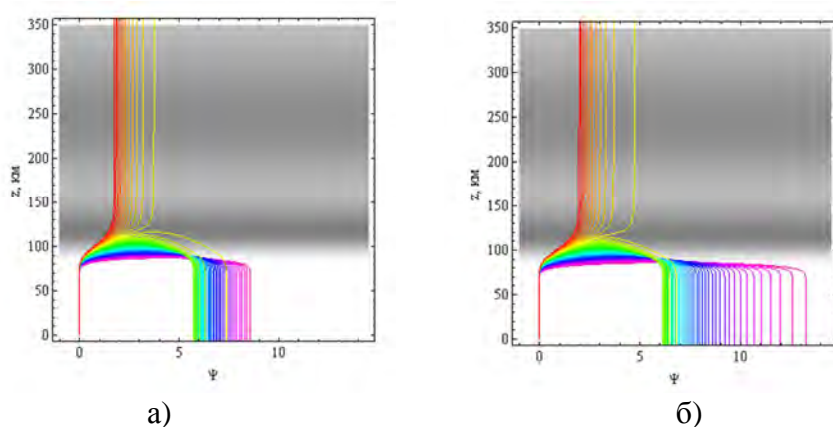


Рис.5. Зависимости поглощения Ψ (в неперках) вдоль траекторий от высоты:

а – обыкновенная волна; б – необыкновенная волна (угол выхода 30°)

Для определения расходимости необходимо преобразовать бихарактеристическую систему (3) к виду

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial \omega^2 \epsilon}{\partial \vec{r}} / \frac{\partial \omega^2 \epsilon}{\partial \omega}; \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \left(2c^2 \vec{k} - \frac{\partial \omega^2 \epsilon}{\partial \vec{k}} \right) / \frac{\partial \omega^2 \epsilon}{\partial \omega}, \quad (12)$$

известному как бихарактеристическая система Лукина [15, 16], и дополнить ее системой уравнений (12) с соответствующими начальными данными, т.е. решить расширенную бихарактеристическую систему [2, 15, 16]. Получив решение расширенной бихарактеристической системы можно вычислить якобиан J расходимости лучевой трубки [2, 13, 15, 16] и найти расходимость поля в каждой точке пространства:

$$A_m = 10 \cdot \lg \left| \frac{J_0}{J(\vec{r})} \right|. \quad (13)$$

В формуле (13) J_0 – якобиан расходимости на условном расстоянии от источника (в расчетах был условно выбран 1 м). Величина $\epsilon = \epsilon_r$.

На рис. 5 показаны зависимости расходимости вдоль лучевых траекторий от высоты (в дБ). С помощью рисунка можно оценить амплитуду сигнала в точке приема.

На рис. 6 в первую очередь следует отметить траекторию, соответствующую высокочастотному сигналу. Она имеет небольшой излом в окрестности максимума слоя F, что связано с дефокусировкой сигнала. Горизонтальные линии соответствуют каустикам. Это области фокусировки поля. Из рис. 6 следует, что лучи, соответствующие дальнему распространению (см. рис. 3), иногда называемые лучами Педерсена, испытывают очень большую расходимость.

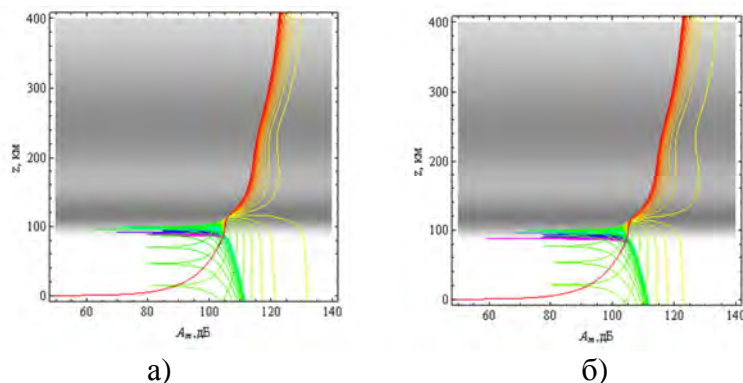


Рис.6. Зависимости расходимости вдоль лучевых траекторий от высоты (в дБ):
а – обыкновенная волна; б – необыкновенная волна (угол выхода 30°). Дневная ионосфера

С помощью рис. 3, 5 и 6 можно оценить амплитуду сигнала в точке приема. Как известно, действующая напряженность электрического поля изотропного излучателя в пустоте определяется формулой

$$E_{\partial 0} = \frac{\sqrt{30W}}{r} \text{ [В/м]}, \quad (14)$$

где W – мощность, Вт;

r – расстояние до источника излучения, м.

Тогда действующую напряженность электрического поля в некоторой точке пространства можно оценить по формуле

$$E_{\partial} = E_{\partial 0} e^{-\Psi} 10^{-A_m/20} \text{ [В/м]}. \quad (15)$$

Например, для лучей с частотой $\sim 4,25$ МГц на земле (расстояние ~ 370 км от источника) поглощение будет порядка одного 7 Нп для обыкновенной волны и 8 Нп для необыкновенной волны, а расходимость – около 110 дБ. Если предположить, что мощность источника

1 кВт, то напряженность поля в этой точке составит 0,5 мкВ/м для обыкновенной волны и 0,18 мкВ/м для необыкновенной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе выполнено математическое моделирование распространения радиоволн в ионосфере с учетом магнитного поля Земли, частотной модуляции и влияния частоты соударений электронов на отклоняющее поглощение. Сопоставлены особенности распространения ЛЧМ сигналов в двухслоевой анизотропной ионосфере в случае обыкновенной и необыкновенной волны. Исследованы поглощение радиоволны и расходимость вдоль лучей и влияние этих факторов на ослабление амплитуды радиосигнала. Расчеты выполнены для дневной модели электронной концентрации высокоширотной ионосферной плазмы. Рассмотрены проекции лучей на разные координатные плоскости: на плоскость распространения и боковую плоскость. Для расчетов лучевых характеристик применялась бихарактеристическая система дифференциальных уравнений, неизвестными в которой являются координаты луча, компоненты волнового вектора, а также частота и время. Для определения ослабления напряженности электрического поля вдоль траектории рассчитывалась расходимость лучевого потока на основе расширенной бихарактеристической системы уравнений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-02-00544-а, №17-02-01183-а).

Список используемых источников

1. *Иванов Д.В.* Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: моногр. – Йошкар-Ола: Марийский гос. техн. ун-т, 2006. – 266 с.
2. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С.* Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме. // Радиотехника и электроника. – М.: Наука, 2012. – Т.57, № 9. – С. 1028–1034.
3. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В.* Теория пространственной фокусировки видеоимпульсов в диспергирующих средах // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т.12, № 8. – С.15–25.
4. *Крюковский А.С., Зайчиков И.В.* Особенности распространения радиоимпульсов в средах с дисперсией // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т.13, № 8. – С. 36–41.
5. *Кирьянова К.С., Крюковский А.С.* Особенности лучевого распространения радиоволн в ионосфере Земли // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № 11. – С. 25–28.
6. *Крюковский А.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И.* Исследование распространения частотно-модулированных пространственно-временных сигналов в неоднородной анизотропной ионосфере // Вестник Российского нового университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – М.: РосНОУ, 2013. – Вып. 4. – С. 47–52.
7. Математическое моделирование распространения частотно-модулированных радиоволн в ионосферной плазме / А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев, Ю.И. Скворцова // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 10. – С. 1001–1009.
8. Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде / А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев, Ю.И. Скворцова // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т.9, №9. – С.40–47.

9. *Крюковский А.С., Скворцова Ю.И.* Математическое моделирование распространения радиоволн в нестационарной плазме с учетом кривизны поверхности Земли и ионосферных слоев // Вестник Российского нового университета. Сер. Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2016. – №1-2. – С.34–40
10. *Бова Ю.И.* Математическое моделирование распространения радиоволн в ионосфере Земли в зависимости от высоты источника излучения // Вестник Российского нового университета. Сер. Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2016. – №3. – С.10–15.
11. *Крюковский А.С., Скворцова Ю.И.* Влияние пространственно-временных возмущений ионосферной плазмы на распространение радиоволн // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 12-3. – С. 131–135.
12. *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
13. *Лукин Д.С., Палкин Е.А.* Численный канонический метод в задачах дифракции и распространения электромагнитных волн в неоднородных средах. – М.: МФТИ, 1982. – 159 с.
14. ГОСТ 25645.146-89. Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – Ч.1: Таблицы параметров. – 30 с.
15. *Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г.* Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере // Космические исследования. – 1967. – Т. 5, вып. 4. – С. 593–600.
16. *Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г.* Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14, № 9. – С. 1673–1677.

Е.А. Дробашевская*;
А.И. Погорельцев*,
доктор физико-математических наук, профессор;
С.П. Смышляев*,
доктор физико-математических наук, профессор
*РГГМУ, г. Санкт-Петербург

РЕАКЦИЯ ВНЕТРОПИЧЕСКОЙ СТРАТОСФЕРЫ НА СОБЫТИЯ ЭЛЬ-НИНЬО ЮЖНОГО КОЛЕБАНИЯ ВО ВРЕМЯ ВЕСЕННЕЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЦИРКУЛЯЦИИ

Проведено исследование влияния Ла-Нинья Эль-Ниньо Южного Колебания (ЭНЮК) на температуру и озон в полярных районах во время весенней перестройки циркуляции стратосферы. Установлено, что во время фазы Ла-Нинья межгодовая изменчивость температуры и относительной объемной концентрации озона на высотах стратосферы больше, чем во время фазы Эль-Ниньо, что косвенно указывает на большую активность динамических процессов.

Ключевые слова: стратосферный озон, весенняя перестройка циркуляции, ЭНЮК, стационарные планетарные волны (СПВ).

ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Исследования последних лет показывают, что в весенние месяцы в отдельные годы наблюдается понижение концентрации озона над арктическим регионом. Было установлено, что весна 2011 года, когда наблюдалось значительное понижение озона в Арктике, соответствует фазе Ла-Нинья Эль-Ниньо Южного Колебания (ЭНЮК) [1, 2]. Для определения фазы ЭНЮК был использован индекс MEI (Multivariate ENSO Index) [3]. Было высказано предположение, что понижение концентрации озона в 2011 году было связано с изменением характера динамических процессов в стратосфере средних и высоких широт, обусловленным событием Ла-Нинья. Однако на динамику стратосферы могут влиять и другие процессы, протекающие в низких широтах (квазидвухлетнее колебание зонального потока, осцилляция Маддена-Джулиана и т.д.), и на основании анализа отдельных лет нельзя сделать окончательные выводы о влиянии ЭНЮК. Поэтому для получения статистически значимых выводов были отобраны 10 лет для фаз Эль-Ниньо и Ла-Нинья (по 5 лет для каждой фазы). Для анализа были выбраны месяцы март–апрель, т.е. временной интервал, когда наблюдается весенняя перестройка циркуляции стратосферы [4]. В соответствии с таблицами индекса MEI за март–апрель, фаза Эль-Ниньо наблюдалась в 1983, 1987, 1992, 1993, 1998 годах, а фаза Ла-Нинья – в 1989, 1999, 2000, 2008, 2011 годах. Исследование внутрисезонной и межгодовой изменчивости температуры и концентрации озона для различных фаз ЭНЮК было выполнено на основе композитного анализа данных ретроспективного анализа MERRA [5].

Среднезональные значения относительной объемной концентрации озона (OMR – ozone mixing ratio) и температуры были усреднены за выбранные годы для условий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Значения температуры, относительной объемной концентрации озона, амплитуды стационарных планетарных волн (СПВ) в поле OMR, межгодовая изменчивость рассчитывались на основании значений, усредненных за март–апрель. При усреднении за выбранные месяцы также рассчитывались средние квадратические отклонения, на основании которых при усреднении за 5 лет рассчитывалась внутрисезонная изменчивость.

Для расчета климатических значений относительной объемной концентрации озона данные были усреднены за 1976–2016 годы, для расчета климатических значений температуры

усреднение проводилось за 1980–2016 годы (рассчитываются как наблюдаемые минус климатические значения и затем деленные на климатические).

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показывают, что внутрисезонная изменчивость среднезональной температуры на высоких широтах в верхней стратосфере в условиях Ла-Нинья больше, чем в условиях Эль-Ниньо. Межгодовая изменчивость на высоких широтах в условиях Ла-Нинья значительно превышает межгодовую изменчивость в условиях Эль-Ниньо.

Среднезональные значения OMR и внутрисезонная изменчивость практически одинаковы для обеих фаз ЭНЮК, в то время как межгодовая изменчивость на высоких широтах в условиях Ла-Нинья существенно выше, чем в условиях Эль-Ниньо.

Большие значения межгодовой изменчивости амплитуды СПВ1 наблюдаются в условиях Ла-Нинья. Среднезональные значения амплитуды СПВ1 и внутрисезонная изменчивость для разных фаз ЭНЮК приблизительно одинаковы. Значения амплитуды СПВ2, а также внутрисезонная и межгодовая изменчивости в условиях Ла-Нинья выше, чем в условиях Эль-Ниньо.

На рис. 1 представлены разница среднезональных значений относительной объемной концентрации озона и разница среднезональной температуры, наблюдаемые во время событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Данные усреднены за два месяца (март и апрель). Статистическая значимость представлена затемнением. Можно отметить, что при условиях, соответствующих событиям Эль-Ниньо, в средней стратосфере на низких широтах наблюдаются статистически значимые более низкие значения относительной объемной концентрации озона и более высокие значения относительной объемной концентрации озона на высоких широтах в стратосфере. Анализ разницы среднезональной температуры показывает, что имеются более высокие значения в полярной верхней стратосфере во время фазы Эль-Ниньо по сравнению с фазой Ла-Нинья.

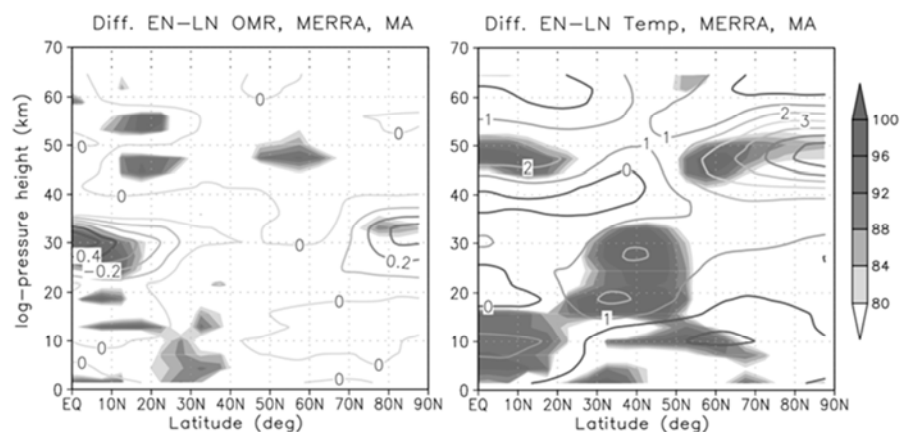


Рис. 1. Левая панель: усредненная за март-апрель разница среднезональных значений OMR (ppmv) между условиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья (изолинии). Правая панель: усредненная за март-апрель разница среднезональной температуры (K) между условиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья (изолинии). Статистическая значимость представлена затемнением

Для более детального анализа были рассмотрены относительные значения (наблюдаемые минус климатические и затем деленные на климатические) температуры и отношения объемной концентрации озона за март-апрель, усредненные по широтному поясу 67,5 с.ш.–87,5 с.ш. для событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Установлено, что самые большие положительные отклонения (достигают 14%) отношения объемной концентрации озона в условиях Эль-Ниньо от климатических значений наблюдаются в первой декаде апреля. В тот же самый

временной интервал, но в условиях Ла-Нинья отклонение отрицательное, достигает -10%. Учитывая полученные отклонения, можно сделать вывод, что разница в среднезональной относительной объемной концентрации озона между условиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья может достигать значений более 20%. Также можно отметить, что в выбранный временной интервал наблюдается охлаждение в верхней стратосфере (отрицательное отклонение от климатических значений) в условиях Ла-Нинья. Во время событий Эль-Ниньо в нижней стратосфере наблюдаются более высокие температуры относительно климатических значений.

На рис. 2 изолиниями представлены усредненные за март-апрель разницы амплитуд СПВ1 (верхняя панель слева) и СПВ2 (нижняя панель слева) в OMR между значениями, наблюдаемыми в условиях Эль-Ниньо и Ла-Нинья. На панелях справа показаны разницы соответствующих амплитуд стационарных планетарных волн в поле температуры. Статистическая значимость отображается затемнением. Из рис. 2 видно, что амплитуда СПВ1 в OMR в средней стратосфере на широтах 40 с.ш.–60 с.ш. во время фазы Эль-Ниньо значительно больше, чем во время фазы Ла-Нинья. Амплитуда СПВ1 в поле температуры в верхней стратосфере в полярных широтах больше во время событий Эль-Ниньо. Амплитуда СПВ2 в OMR на средних широтах в стратосфере больше во время событий Ла-Нинья, однако статистическая значимость разницы невысокая, что говорит о сильной межгодовой изменчивости в этой области атмосферы.

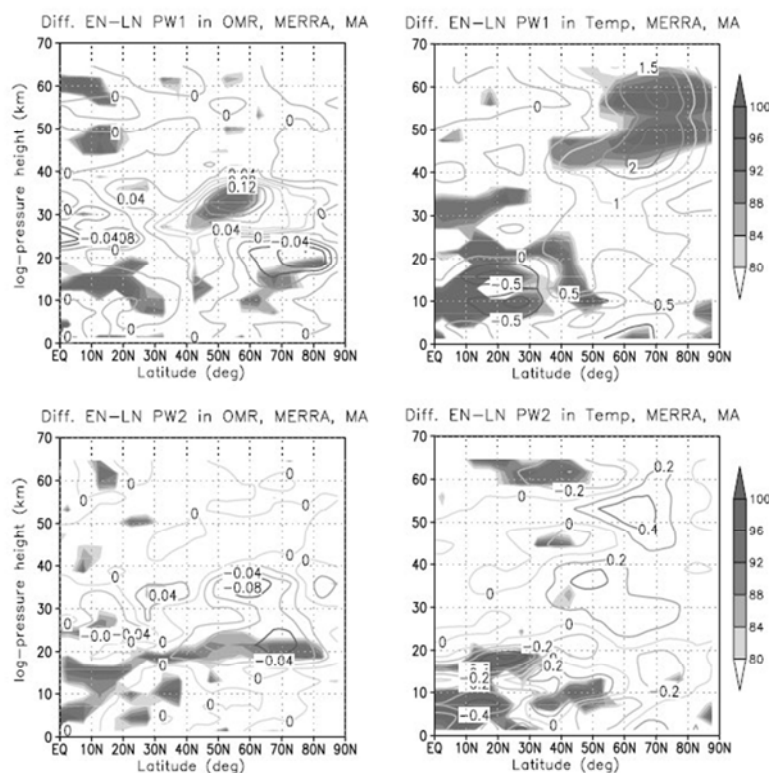


Рис.2. Верхняя левая панель: усредненная за март-апрель разница амплитуд СПВ1 в OMR (p_{rtv}) между условиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья (изолинии). Верхняя правая панель: усредненная за март-апрель разница амплитуд СПВ1 в поле температуры (К) между условиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья (изолинии). Нижняя левая панель: усредненная за март-апрель разница амплитуд СПВ2 в OMR (p_{rtv}) между условиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья (изолинии). Нижняя правая панель: усредненная за март-апрель разница амплитуд СПВ2 в поле температуры (К) между условиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья (изолинии).

Статистическая значимость представлена затемнением

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что наиболее значимые изменения в отношении объемной концентрации озона и температуре наблюдаются в течение временного интервала, приблизительно соответствующего средней дате весеннего перехода (6 апреля) [6]. Также можно отметить, что во время событий Ла-Нинья межгодовая изменчивость температуры и относительной объемной концентрации озона на высотах стратосферы больше, чем во время фазы Эль-Ниньо, что косвенно указывает на большую активность (изменчивость) динамических процессов.

Список используемых источников

1. Влияние динамических факторов на озоновые аномалии в Арктике / С.П. Смышляев, А.И. Погорельцев, Е.А. Дробашевская, А.Ю. Канухина // Ученые записки РГГМУ. – 2015. – № 41. – С. 136–148.
2. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных регионов / С.П. Смышляев, А.И. Погорельцев, В.Я. Галин, Е.А. Дробашевская // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 102–116.
3. Bimonthly MEI values, NOAA Earth System Research Laboratory. – URL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html> (дата обращения: 06.06.2018).
4. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы // Ученые записки РГГМУ. – 2010. – № 11. – С. 53–62.
5. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications / M.M. Rienecker et al. // J. Climate, 24 (14). – 2011. – P. 3624–3648.
6. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere / E.N. Savenkova, A.Y. Kahukhina, A.I. Pogoreltsev, E.G. Merzlyakov // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2012. – Vol. 90-91. – P. 1–8

А.Г. Клово*,
 кандидат физико-математических наук, доцент;
 Г.В. Куповых*,
 доктор физико-математических наук, профессор;
 С.С. Свидельский*,
 Д.В. Тимошенко*,
 кандидат физико-математических наук, доцент
 *Южный федеральный университет, г. Таганрог

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

Представлены результаты моделирования пространственно-временного распределения электрического поля в электродном слое, обусловленные глобальной вариацией электрического тока. В условиях классического электродного эффекта вблизи поверхности Земли колебания происходят синхронно, отличаясь амплитудами возмущений электрического поля на разных высотах. При наличии турбулентного перемешивания в приземной атмосфере дополнительно появляется сдвиг фаз колебаний электрического поля относительно плотности электрического тока.

Ключевые слова: моделирование, электрическое поле, электрический ток, электродный слой, атмосфера, приземный слой, турбулентность.

ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления глобального мониторинга атмосферы, а также для решения ряда специальных задач атмосферного электричества особый интерес представляют нестационарные электродинамические процессы. Суточные вариации электрического поля имеют две компоненты: глобальную и локальную. В роли глобальной компоненты обычно выступает унитарная вариация потенциала ионосферы. Локальные возмущения определяются действием электродного эффекта [1] вблизи поверхности Земли.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ МОДЕЛИ

Для исследования нестационарных электрических процессов в горизонтально-однородной турбулентной свободной от аэрозоля приземной атмосфере будем исходить из системы, состоящей из ионизационно-рекомбинационных уравнений для аэроионов и уравнения Пуассона, в приближении электродного эффекта [2]:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T(z, t) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right] = q - \alpha n_1 n_2,$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 4\pi e (n_1 - n_2), \quad (1)$$

где $n_{1,2}$ – объемная концентрация легких аэроионов;
 $b_{1,2}$ – их подвижность;
 E – напряженность электрического поля;
 q – интенсивность ионообразования;
 α – коэффициент рекомбинации;
 $D_T(z, t)$ – коэффициент турбулентной диффузии для аэроионов;
 z – высота;
 e – элементарный заряд.

Из первых двух уравнений можно получить следующую эквивалентную систему, определяющую электрическую проводимость: $\lambda = e(b_1 n_1 + |b_2| n_2)$, а также плотность электрического заряда $\rho = e(n_1 - n_2)$, соответственно сложением и вычитанием первых двух уравнений. При условии $b_1 = |b_2| = b$ получаем систему

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{b^2}{4\pi} \frac{\partial}{\partial z} \left[E \frac{\partial E}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T(z, t) \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right] = 2qeb - \frac{\alpha}{2be} \left[\lambda^2 - \frac{b^2}{16\pi^2} \left(\frac{\partial E}{\partial z} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda E) - \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T(z, t) \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] = 0. \quad (3)$$

Откуда, используя уравнение Пуассона, после интегрирования второго уравнения получаем уравнение для полного электрического тока (j) в приземной атмосфере

$$\frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi \lambda E - D_T(z, t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = 4\pi j. \quad (4)$$

Вариации плотности электрического тока $j(t)$ вблизи поверхности Земли определяются нестационарностью электрических полей выше приземного слоя, т.е. обуславливаются глобальными изменениями потенциала ионосферы, вызываемыми грозowymi токовыми генераторами, либо генераторами, действующими в верхних слоях атмосферы [3].

Предположим, что значения плотности тока $j(t)$ меняются по некоторому гармоническому закону с амплитудой j_0 и циклической частотой ω , тогда коэффициент турбулентного обмена для стратифицированной атмосферы может не зависеть от времени $D_T(z, t) = D_m z^m, m = 0; 1; 4/3$ [4], если характерный временной масштаб его изменения гораздо больше ω^{-1} . Приведем уравнения системы (2) к безразмерному виду (индекс « ∞ » означает значения характеристик на верхней границе электродного слоя):

$$\lambda' = \lambda / \lambda_\infty, \quad E' = E / E_\infty, \quad E_\infty = j_0 / \lambda_\infty, \quad l_m = (D_m \tau)^{1/2-m}, \quad \tau = (q_\infty \cdot \alpha)^{-1/2}, \quad z' = z / l_m, \quad t' = \omega \cdot t, \\ z'' = z / L_m, \quad L_m = (D_m \tau_\lambda)^{1/2-m}, \quad \tau_\lambda = 1 / 4\pi \lambda_\infty, \quad \lambda_\infty = 2e \cdot b \cdot n_\infty. \quad (5)$$

В результате замены уравнения (2) и (4) преобразуются к виду:

$$\omega \tau \frac{\partial \lambda'}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} z^m \frac{\partial \lambda'}{\partial z'} + \frac{b^2 E_\infty^2}{l_m^2} \tau_\lambda \tau \frac{\partial}{\partial z'} \left[E' \frac{\partial E'}{\partial z'} \right] = l - \left[\lambda'^2 - \frac{b^2 E_\infty^2 \tau_\lambda^2}{l_m^2} \left(\frac{dE'}{dz'} \right)^2 \right], \quad (6)$$

$$\omega \tau_\lambda \frac{\partial E'}{\partial t'} + \lambda' E' - z''^m \frac{\partial^2 E'}{\partial z''^2} = j / j_0. \quad (7)$$

При условии $\omega \tau \ll 1, \omega \tau_\lambda \ll 1, \omega \tau_\lambda \ll 1$ систему уравнений (6) и (7) можно рассматривать как квазистационарную. Если выполняются условия $b^2 E_\infty^2 \tau_\lambda^2 / l_m^2 \ll 1$ и $b^2 E_\infty^2 \tau_\lambda \tau / l_m^2 \ll 1$, то влиянием электрического поля в уравнении (6) можно пренебречь, а распределение электрической проводимости в приземном слое определяется только турбулентным переносом и ионизационно-рекомбинационными процессами, т.е. не зависит от изменений электрического тока $j(t)$.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Рассмотрим общую задачу о вариации электрического поля вблизи поверхности Земли вследствие изменений глобального электрического тока. Будем предполагать $\lambda = \text{const}, m = 0, D_T = D_0 = \text{const}$, что соответствует условиям устойчивой стратификации приземной ат-

мосферы. Общий вид граничных и начальных условий для уравнения (4), с соответствующей левой частью, может быть представлен следующим образом:

$$E|_{z \rightarrow 0} = E_0, \quad E|_{t=0} = E(0, z), \quad \left(\frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi\lambda E \right) \Big|_{z \rightarrow \infty} = 4\pi j_0(t). \quad (8)$$

Последнее условие можно рассматривать как отдельное уравнение

$$\frac{dE}{dt} + 4\pi\lambda E = 4\pi j(t), \quad (9)$$

описывающее вариации электрического поля на верхней границе электродного слоя вследствие изменений глобального тока. Зададим ток, меняющийся по гармоническому закону в течение суток $j(t) = j_0(2 - \cos(\omega t))$. Тогда решением уравнения (9) при граничном условии

$$E|_{t=0} = \frac{j_0}{\lambda}$$

является

$$E(t) = \left(\frac{16\pi^2 \lambda j_0}{\omega^2 + (4\pi\lambda)^2} - \frac{j_0}{\lambda} \right) e^{-4\pi\lambda t} + \frac{2j_0}{\lambda} - \frac{4\pi j_0}{\omega^2 + (4\pi\lambda)^2} (4\pi\lambda \cos(\omega t) + \omega \sin(\omega t)). \quad (10)$$

Из выражения (10) с учетом оценки значений параметров, входящих в решение ($\omega \ll 4\pi\lambda$, $\lambda \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $\omega = 2\pi/T$, $T = 24 \text{ ч}$), пренебрегая малыми слагаемыми, получаем выражение $E(t) = (j_0/\lambda)(2 - \cos(\omega t))$, т.е. закон изменения электрического поля во времени на верхней границе электродного слоя полностью совпадает с заданной вариацией электрического тока. Физически полученный выше результат соответствует предельному случаю, когда электродный эффект у поверхности Земли отсутствует. Рассмотрим случай классического электродного слоя, т.е. когда значения электрической проводимости воздуха зависят от высоты. Тогда, предполагая, что $\lambda = \lambda_0 \exp(z/l_0)$, где l_0 – характерная высота классического электродного слоя, получаем распределение электрического поля в приземной атмосфере

$$E(z; t) = \frac{j_0}{\lambda_0 \cdot e^{z/l_0}} \cdot (2 - \cos(\omega t)). \quad (11)$$

На рис. 1 представлены вариации электрического поля и плотности тока (в относительных единицах) на разных высотах над поверхностью Земли. Колебания величин совпадают по времени, но различаются по амплитудным значениям. С увеличением высоты значения амплитуды возмущения электрического поля уменьшаются. При увеличении значений l_0 возмущения на фиксированной высоте увеличиваются (рис.2).

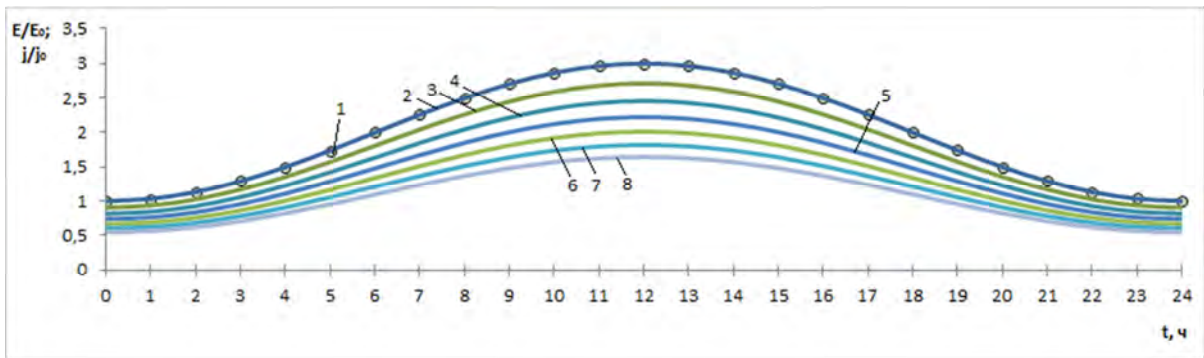


Рис.1. Вариации плотности тока (кривая 1) и электрического поля на различных высотах (кривые 2–7 при $z = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 \text{ м}$ соответственно)

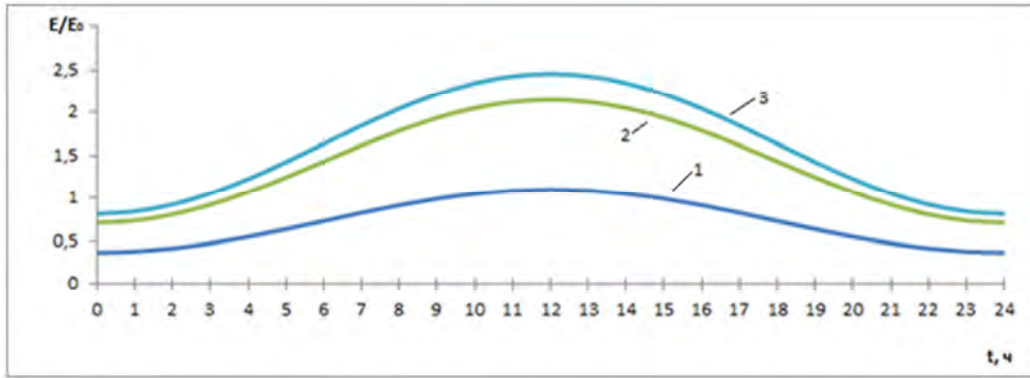


Рис.2. Вариации электрического поля на высоте 1 м при различных значениях высоты классического электродного слоя (1 – $l_0 = 1$ м; 2 – $l_0 = 3$ м; 3 – $l_0 = 5$ м)

Далее рассмотрим задачу о пространственно-временном распределении электрического поля $E(z, t)$ в турбулентном электродном слое вследствие вариации плотности электрического тока на его верхней границе. Вернемся к уравнению (4) с уточненными начальными и граничными условиями: $E|_{t=0} = E_0 \cdot e^{-z/l}$, $E|_{z=z_0} = E_0$, $\frac{\partial^2 E}{\partial z^2}|_{z=l} = 0$, где l – характерная высота турбулентного электродного слоя; z_0 – параметр шероховатости земной поверхности. Приближенное аналитическое решение поставленной задачи получено методом Фурье [5]. В первом приближении выражение для распределения электрического поля в приземной атмосфере имеет вид:

$$E(z, t) = E_0 + \left(E_0 \beta_1 e^{-p_1 t} \sqrt{2/l} - \frac{e^{p_1 t}}{\omega^2 + p_1^2} (e^{-p_1 t} (\cos \omega t - \omega \sin \omega t) - p_1) \right) \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi z}{l},$$

$$\beta_1 = E_0 \sqrt{\frac{2}{l}} \left(\frac{e^{-\frac{z_0}{l}} (\sin(\pi z_0/l) + \pi \cos(\pi z_0/l)) - \pi}{1/l + \pi^2/l} + (l/\pi) (\cos(\pi z_0/l) - 1) \right),$$

$$p_1 = 4\pi\lambda + D_0 (\pi/l)^2. \quad (12)$$

Совмещение в безразмерных значениях графиков плотности тока (рис. 3, кривая 1) и напряженности поля для разных значений высоты в турбулентном электродном слое пока-

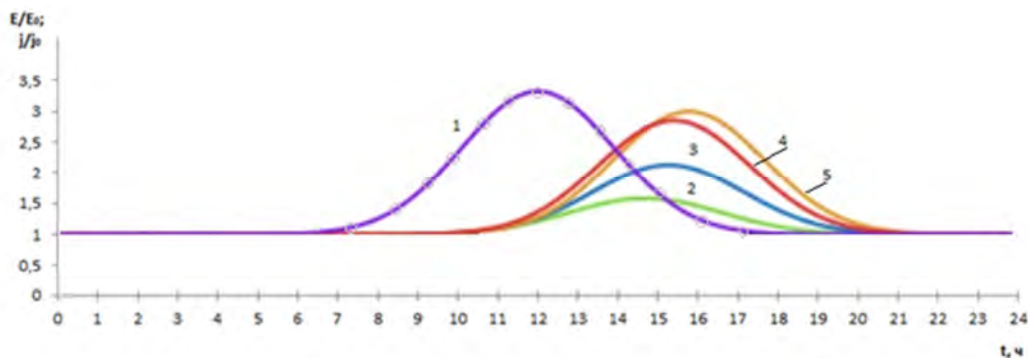


Рис.3. Вариации плотности тока (1) и электрического поля (2–5) на различных высотах в турбулентном электродном слое

зывает смещение пиковых значений напряженности по времени относительно тока (от трех до четырех часов) – смещение фазы и изменение амплитуды напряженности (рис. 3, кривые 2 – 0,1 м; 3 – 1 м; 4 – 5 м; 5 – 10 м).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное аналитическое моделирование влияния глобальной вариации электрического тока на электрическом поле в приземной атмосфере позволяет сделать вывод, что существование электродного слоя вблизи поверхности Земли приводит к различным амплитудным значениям возмущений электрического поля по высоте в классическом электродном слое. В случае турбулентного электродного слоя к этому добавляется сдвиг фаз колебания электрического поля относительно плотности электрического тока.

Список используемых источников

1. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере: моногр. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
2. *Куповых Г.В.* Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог: Изд-во ГТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
3. *Морозов В.Н., Куповых Г.В.* Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. – СПб.: Астерион, 2017. – 307 с.
4. *Морозов В.Н.* Атмосферное электричество // Атмосфера: справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 394–408.
5. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – СПб.: Лань, 2003. – 831 с.

А.В. Костромитинов*;

М.Ю. Рудь*

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

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ ЦИКЛОНА НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье описана модель представления облачности циклона, позволяющая использовать данные космических аппаратов гидрометеорологического назначения для получения численных характеристик структуры циклонических облачных спиралей для последующего их использования при диагностике поля геопотенциала в районах, слабо освещенных аэрологическими наблюдениями. Модель построена на основе теоретико-множественного подхода к анализу полей облачности циклонов, просматриваемых на снимках земной поверхности из космоса. Использование модели позволяет подойти к диагностике гидрометеорологических условий с позиции обеспечения точности диагностики поля геопотенциала, а следовательно, и с позиции повышения эффективности функционирования специализированных автоматизированных систем гидрометеорологического обеспечения.

Ключевые слова: облачность циклона, диагностика поля геопотенциала, космические аппараты гидрометеорологического назначения.

В настоящее время сеть аэрологических станций на земном шаре является достаточно разреженной по сравнению с сетью станций приземных наблюдений. Особенно данная проблема касается таких территорий, как акватории морей и океанов, пустыни, горы, где станции температурно-ветрового зондирования атмосферы практически отсутствуют. Для уточнения поля геопотенциала, формируемого на основе данных аэрологических наблюдений, как правило, используются дополнительные данные, например данные о поле ветра, которые не всегда доступны или могут являться неточными.

В данной статье для уточнения поля геопотенциала предлагается использовать данные, получаемые от космических аппаратов гидрометеорологического назначения (КА ГМН). Как известно, поле геопотенциала в тропосфере в наибольшей степени определяет погоду в том или ином районе земного шара [1], а дополнительное использование данных КА ГМН при его анализе позволит повысить точность диагностики погодных условий на территориях, слабо освещенных аэрологическими наблюдениями.

Данные КА ГМН, а именно радиометрически калиброванные и географически привязанные изображения земной поверхности в инфракрасном и видимом диапазонах спектра электромагнитного излучения, представляются в виде растровых изображений земной поверхности в оттенках серого цвета. Анализ таких изображений, как правило, направлен на идентификацию типов представленной на изображении облачности [2], на определение местоположения кромки льда в акватории Северного Ледовитого океана и не предоставляет возможности получения информации о поле геопотенциала на изображенной территории. Поэтому требуется разработать модель представления данных КА ГМН, которая позволит получать информацию о поле геопотенциала по изображенной на спутниковом снимке территории.

Рассмотрим поток данных A , которые поступают от полярноорбитальных КА ГМН типа «Метеор-М» №2, принимаемый на автономный пункт приема и обработки космической метеорологической информации «Сюжет-МБ». В данном потоке передается информация об участках земной поверхности, соответствующих каждому пикселю растрового спутникового снимка. Вместе все эти пиксели образуют матрицу, которую можно записать в следующем виде:

$$A_{\langle M, N \rangle} = \{a_{mn}\}; m = 1(1)M; n = 1(1)N, \quad (1)$$

где M – число строк матрицы пикселей спутникового снимка, передаваемого КА ГМН за время сеанса связи;

N – число пикселей в строке сканирования, которое определяется возможностями сканирующей аппаратуры и, например, для КА ГМН Метеор-М №2, составляет 2048.

Информация о пикселях матрицы представляет собой измеренную и откалиброванную яркостную температуру земной поверхности (для инфракрасного диапазона) либо альбедо земной поверхности (для видимого диапазона). Матрицу значений яркостных температур в каждом пикселе можно записать в следующем виде:

$$I_{\langle M,N \rangle} = \{i_{mn}\}, m = 1(1)M, n = 1(1)N. \quad (2)$$

Рассмотрим оператор F , который для каждого пикселя матрицы $A_{\langle M,N \rangle}$ определяет соответствующее ей значение яркостной температуры из матрицы $I_{\langle M,N \rangle}$. Тогда

$$i_{mn} = F\{a_{mn}\}, m = 1(1)M, n = 1(1)N. \quad (3)$$

Каждый пиксель матрицы $A_{\langle M,N \rangle}$ также имеет некоторые географические координаты. Неизвестные матрицы значений широт и долгот пикселей можно представить в виде выражений:

$$\Phi_{\langle M,N \rangle} = \{\varphi_{mn}\}, m = 1(1)M, n = 1(1)N, \quad (4)$$

$$\Lambda_{\langle M,N \rangle} = \{\lambda_{mn}\}, m = 1(1)M, n = 1(1)N, \quad (5)$$

где $\Phi_{\langle M,N \rangle}$ – матрица значений широт пикселей;

$\Lambda_{\langle M,N \rangle}$ – матрица значений долгот пикселей.

Рассмотрим операторы P_φ и P_λ , которые определяют широту φ_{mn} и долготу λ_{mn} каждого пикселя матрицы $A_{\langle M,N \rangle}$. Тогда справедливы следующие равенства:

$$\varphi_{mn} = P_\varphi(a_{mn}, Q_t), m = 1(1)M, n = 1(1)N, \quad (6)$$

$$\lambda_{mn} = P_\lambda(a_{mn}, Q_t), m = 1(1)M, n = 1(1)N, \quad (7)$$

где Q_t – набор эфемерид КА ГМН в момент времени t .

В обобщенном виде (6) и (7) можно представить как

$$(\varphi_{mn}, \lambda_{mn}) = C(a_{mn}, Q_t), m = 1(1)M, n = 1(1)N, \quad (8)$$

где C – оператор определения координат пикселя.

В основе операторов P_φ и P_λ для получения значений координат пикселей используется модель SGP4/SDP4, с помощью которой на основе эфемерид КА ГМН можно рассчитать координаты спутника, координаты подспутниковой точки [3], и правила сферической геометрии, которые позволяют определить координаты каждого пикселя в строке. При расчетах также во внимание принимается разрешающая способность сканирующей аппаратуры. Например, у КА ГМН «Метеор-М» №2 размер пикселя в строке сканирования составляет 1×1 км в подспутниковой области и 4×1 км на краях строки.

Так как с помощью разрабатываемой модели планируется получать информацию о барическом поле, а поле облачности циклона близко по форме к логарифмической спирали [1, 4], далее рассмотрим оператор R , выбирающий в матрице $A_{\langle M,N \rangle}$ матрицу пикселей размерности $K \times L$, ограничивающих область нахождения циклонической облачной спирали в случае ее наличия на спутниковом снимке. Данную матрицу можно представить в виде

$$A_{R\langle K,L \rangle} = \{a_{Rkl}\} = R(A_{\langle M,N \rangle}, Y_{\langle 4 \rangle}), k = 1(1)K, l = 1(1)L, \quad (9)$$

где $A_{R\langle K,L \rangle}$ – выбранная матрица размерности $K \times L$;

$Y_{\langle 4 \rangle}$ – вектор границ области спирали, $Y_{\langle 4 \rangle} = \langle m_1, m_2, n_1, n_2 \rangle^T$;

m_1 и m_2 – номера строк;

n_1 и n_2 – номера столбцов.

Исходя из формулы (9), для каждого элемента a_R и a справедливо выражение

$$a_{Rkl} = a_{(m_1+k)(n_1+l)}, k = 1(1)K, l = 1(1)L. \quad (10)$$

Также отметим, что

$$K = m_2 - m_1, \quad L = n_2 - n_1. \quad (11)$$

Пиксели, соответствующие на спутниковом снимке циклонической облачной спирали в инфракрасном диапазоне, обладают отличительной особенностью. Земная поверхность в области этих пикселей имеет наименьшую яркостную температуру по сравнению с другими пикселями выбранной матрицы $A_{R<K,L>}$. Это связано с тем, что циклоническая облачная спираль образована в том числе перистой облачностью, являющейся самой высокой на рассматриваемой территории и, как следствие, обладающей наименьшей температурой. С учетом этого рассмотрим оператор H , выбирающий в матрице $A_{R<K,L>}$ множество $A_{H<J>}$ пикселей, соответствующих облачной спирали, путем сравнения значений яркостной температуры земной поверхности в области этих пикселей с некоторым пороговым значением. Указанное множество можно представить в следующем виде:

$$A_{H<J>} = \{a_{Hj}\} = H(A_{R<K,L>}, I_{\text{пор}}), j = 1(1)J, \quad (12)$$

$$H(A_{R<K,L>}, I_{\text{пор}}) : a_{Rkl} = a_{Hj}, \text{ если } F(a_{Rkl}) \leq I_{\text{пор}}, j = 1(1)J,$$

где $I_{\text{пор}}$ – предельно высокое значение яркостной температуры земной поверхности в области пикселей спутникового снимка, соответствующих циклонической облачной спирали;

J – количество выбранных пикселей.

С учетом выражений (6) и (7) координаты пикселей, соответствующих циклонической облачной спирали $(\Phi_{<J>}, \Lambda_{<J>})_H$, определяются по формуле

$$(\Phi_{<J>}, \Lambda_{<J>})_H = ((\varphi_j), (\lambda_j))_H = (P_\varphi(A_{H<J>}, Q_t), P_\lambda(A_{H<J>}, Q_t)). \quad (13)$$

Для последующего анализа поля облачности циклона и дальнейшей диагностики поля геопотенциала кроме координат пикселей спирали на спутниковом снимке, которые дают представление о местоположении и пространственных масштабах циклона, необходимо знать координаты центра облачной спирали, которые соответствуют местоположению центра циклона.

У логарифмической спирали, ориентированной по сторонам света, линия, соединяющая северную и южную точки одного витка, пересекается с линией, соединяющей западную и восточную точки того же витка, в центре спирали. Учитывая данный факт, предлагается определять координаты центра циклона на основе координат северной, южной, западной и восточной точек циклонической облачности. Причины выбора этих точек указаны в [5].

Рассмотрим оператор $B = \langle B_N, B_S, B_W, B_E \rangle$, определяющий среди пикселей множества $A_{H<J>}$ самые северный, южный, западный и восточный пиксели. Тогда множество A_{NSWE} указанных точек можно записать в следующем виде:

$$A_{NSWE} = \langle a_N, a_S, a_W, a_E \rangle = B(A_{H<J>}) = \\ = \langle B_N(A_{H<J>}), B_S(A_{H<J>}), B_W(A_{H<J>}), B_E(A_{H<J>}) \rangle, \quad (14)$$

где a_N – северный пиксель спутникового снимка, соответствующий облачной спирали;

a_S – южный пиксель спутникового снимка, соответствующий облачной спирали;

a_W – западный пиксель спутникового снимка, соответствующий облачной спирали;

a_E – восточный пиксель спутникового снимка, соответствующий облачной спирали;

$$B_N(A_{H<J>}) : a_{Hj} = a_N, \text{ если } P_\varphi(a_{Hj}, Q_t) = \varphi_{\text{max}} \text{ для всех } j = 1(1)J;$$

$$B_S(A_{H<J>}) : a_{Hj} = a_S, \text{ если } P_\varphi(a_{Hj}, Q_t) = \varphi_{\text{min}} \text{ для всех } j = 1(1)J;$$

$$B_W(A_{H<J>}) : a_{Hj} = a_W, \text{ если } P_\lambda(a_{Hj}, Q_t) = \lambda_{\text{min}} \text{ для всех } j = 1(1)J;$$

$$B_E(A_{H<J>}) : a_{Hj} = a_E, \text{ если } P_\lambda(a_{Hj}, Q_t) = \lambda_{\text{max}} \text{ для всех } j = 1(1)J;$$

$$\varphi_{\text{max}} = \max P_\varphi(A_H, Q_t);$$

$$\begin{aligned}\varphi_{\min} &= \min P_{\varphi}(A_H, Q_t); \\ \lambda_{\min} &= \min P_{\lambda}(A_H, Q_t); \\ \lambda_{\max} &= \max P_{\lambda}(A_H, Q_t).\end{aligned}$$

Таким образом, оператор B определяет четыре пикселя из множества $A_{H<J>}$ с максимальными и минимальными значениями широты и долготы, соответствующие северной, южной, западной и восточной точкам циклонической облачной спирали. Координаты данных пикселей определяются согласно выражениям (15)–(18) соответственно:

$$(\varphi_N, \lambda_N) = (\varphi_{\max}, P_{\lambda}(a_N, Q_t)), \quad (15)$$

где φ_N – широта северной точки;

λ_N – долгота северной точки;

$$(\varphi_S, \lambda_S) = (\varphi_{\min}, P_{\lambda}(a_S, Q_t)), \quad (16)$$

где φ_S – широта южной точки;

λ_S – долгота южной точки;

$$(\varphi_W, \lambda_W) = (P_{\varphi}(a_W, Q_t), \lambda_{\min}), \quad (17)$$

где φ_W – широта западной точки;

λ_W – долгота западной точки;

$$(\varphi_E, \lambda_E) = (P_{\varphi}(a_E, Q_t), \lambda_{\max}), \quad (18)$$

где φ_E – широта восточной точки;

λ_E – долгота восточной точки.

Если известны координаты северной, южной, западной и восточной точек циклонической облачной спирали, предлагается приближенно определять координаты ее центра (φ_0, λ_0) по формулам линейной геометрии:

$$\varphi_0 = k_1 \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2} + b_1, \quad (19)$$

$$\lambda_0 = \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2}, \quad (20)$$

где

$$b_1 = \frac{\lambda_S \varphi_N - \lambda_N \varphi_S}{\lambda_S - \lambda_N}, b_2 = \frac{\lambda_W \varphi_E - \lambda_E \varphi_W}{\lambda_W - \lambda_E}, k_1 = \frac{\varphi_S - \varphi_N}{\lambda_S - \lambda_N}, k_2 = \frac{\varphi_W - \varphi_E}{\lambda_W - \lambda_E}.$$

Таким образом, данные, поступающие от КА ГМН, представляются в виде множества пикселей спутникового снимка, соответствующих циклонической облачной спирали, их координат $(\Phi_{<J>}, \Lambda_{<J>})_H$ и координат центра спирали (φ_0, λ_0) .

С учетом соотношений (8), (9), (12)–(14) в аналитическом виде модель представления данных, поступающих от КА ГМН, полностью можно определить формулами:

$$\Phi_{<J>} = P_{\varphi}(H(R(A_{<M,N>}, Y_{<4>}), I_{\text{пор}}), Q_t), \quad (21)$$

$$\Lambda_{<J>} = P_{\lambda}(H(R(A_{<M,N>}, Y_{<4>}), I_{\text{пор}}), Q_t), \quad (22)$$

$$(\varphi_0, \lambda_0) = L\left(C\left(B\left(H(R(A_{<M,N>}, Y_{<4>}), I_{\text{пор}})\right), Q_t\right)\right), \quad (23)$$

где L – оператор расчета координат точки пересечения двух прямых, проходящих через две точки с известными координатами.

Таким образом, в соответствии с выражениями (21) и (22) данные, поступающие от КА ГМН, представляются в виде координат точек циклонической облачной спирали. В соответствии с выражением (22) те же данные представляются в виде координат центра циклонической облачной спирали.

В общем виде схема разработанной модели представления данных, поступающих от КА ГМН, показана на рис. 1.

Подробно на основании формул (6)–(20) разработанная модель представлена на рис. 2.

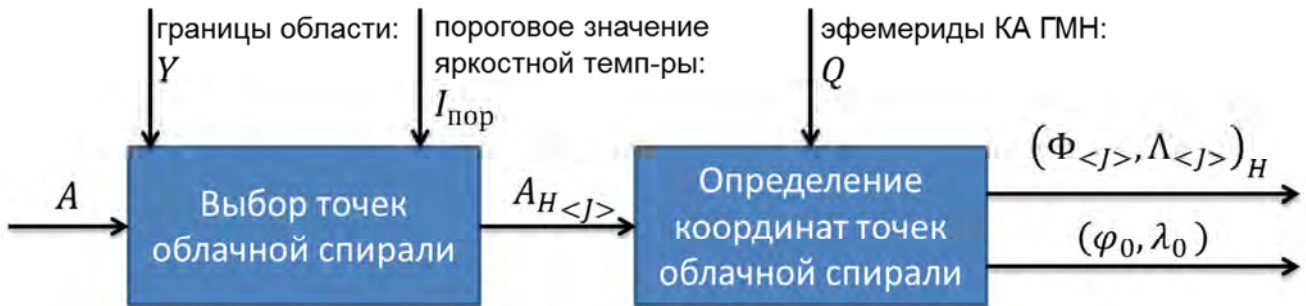


Рис.1. Общая схема модели представления облачности циклона

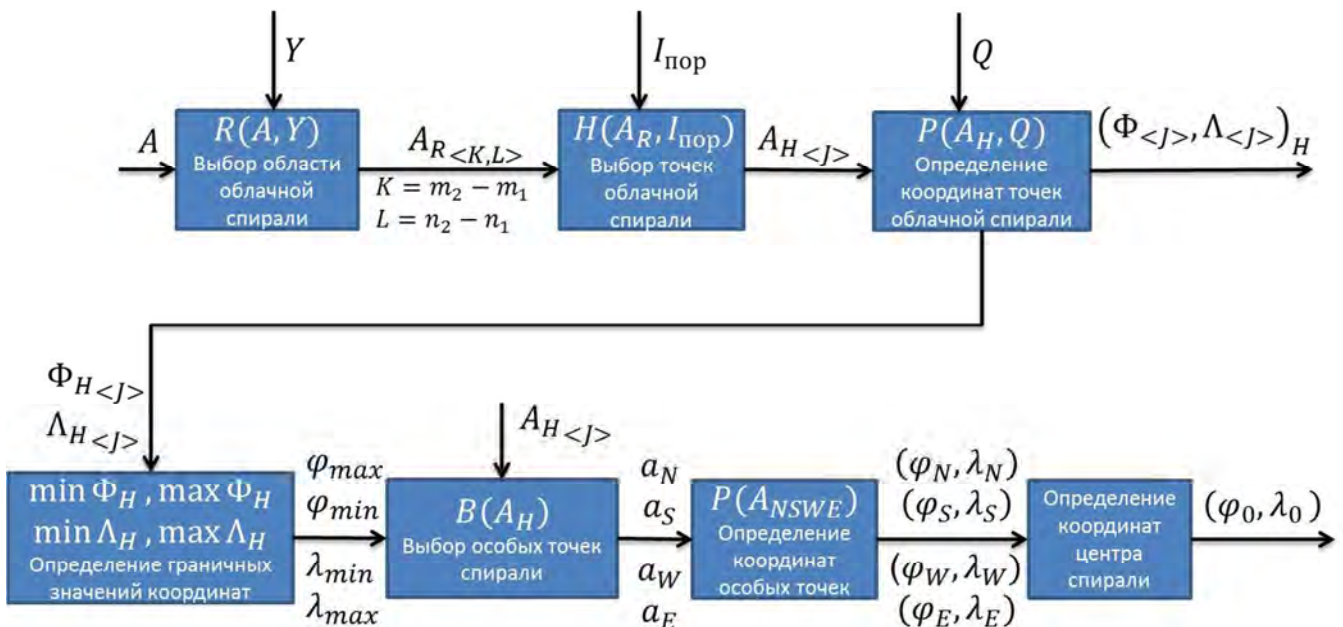


Рис.2. Подробная схема модели представления облачности циклона

В зависимости от значений параметров Y , $I_{\text{пор}}$ и Q по разработанной модели данные, поступающие от КА ГМН, представляются в виде географических координат различного количества точек циклонической облачной спирали при ее наличии на просканированной территории во время сеанса связи. Также чем точнее эфемериды Q_t для конкретного момента времени t , тем точнее будут определены координаты точек спирали. За пороговое значение $I_{\text{пор}}$ предлагается принимать значение яркостной температуры, превышающее минимальное на 10% от разницы максимального и минимального значений в области, которой соответствует спутниковый снимок:

$$I_{\text{пор}} = I_{\text{min}} + 0,1(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}), \quad (24)$$

где I_{max} – максимальное значение яркостной температуры земной поверхности в области, которой соответствуют матрица пикселей спутникового снимка $A_{\langle M, N \rangle}$,

I_{min} – минимальное значение яркостной температуры земной поверхности в области, которой соответствуют матрица пикселей спутникового снимка $A_{\langle M, N \rangle}$.

Следует отметить, что определение границ Y прямоугольной области циклонической облачной спирали возможно осуществлять как на основе визуального анализа растрового изображения земной поверхности, формируемого на основе принятых от КА ГМН данных, так и методами теории распознавания образов [6].

Разработанную модель предлагается использовать для представления данных КА ГМН, являющихся изображениями земной поверхности не только в инфракрасном, но и в видимом диапазоне спектра. В этом случае вместо $I_{\langle M,N \rangle}$ будет использоваться матрица значений альбедо земной поверхности в точках сканирования, а пороговое значение альбедо $Al_{\text{пор}}$ будет рассчитываться по формуле

$$Al_{\text{пор}} = Al_{\text{max}} - 0,1(Al_{\text{max}} - Al_{\text{min}}), \quad (25)$$

где Al_{max} – максимальное значение альбедо земной поверхности в области, которой соответствует матрица пикселей спутникового снимка $A_{\langle M,N \rangle}$;

Al_{min} – минимальное значение альбедо земной поверхности в области, которой соответствует матрица пикселей спутникового снимка $A_{\langle M,N \rangle}$.

Таким образом, разработанная модель позволяет представить данные КА ГМН в виде, удобном для анализа облачности, соответствующей таким барическим образованиям, как циклоны. Последующая обработка этих данных дает возможность получить численные параметры облачности циклона. Применение этих параметров для определения физико-статистических зависимостей между полями облачности и геопотенциала описано в [5] и является дальнейшим направлением исследований.

Список используемых источников

1. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
2. Костромитинов А.В., Готюр И.А. Методика уточнения поля геопотенциала над акваториями океанов // Навигация и гидрография. – 2013. – №36. – С. 97–105.
3. Hoots F.R., Roehrich R.L. Models for Propagation of NORAD Element Sets // SpaceTrack. – TS Kelso, 1980. – Report № 3.
4. Андронников В.В. Анализ и прогноз синоптического положения по вихревой структуре облачности. – Воронеж, 2003. – 74 с.
5. Физико-статистическая модель поля ветра в циклоне на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса / А.В. Костромитинов, А.А. Корыстин, П.А. Прохоренко и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 55–62.
6. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 416 с.

И.Н. Ростокин*,
кандидат техн. наук, доцент;

Е.А. Ростокينا*;

Е.В. Федосеева*,
доктор техн. 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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА УГЛОМЕСТНОГО МНОГОЧАСТОТНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты моделирования погрешности угломестных измерений радиояркой температуры однородной атмосферы, обусловленной вкладом фонового излучения в антенную температуру СВЧ радиометрической системы при одноканальном (без компенсации фоновых шумов) и двухканальном разностном приеме (с компенсацией вклада фоновых шумов). Показаны экспериментальные результаты измерений мощности радиотеплового излучения однородной атмосферы многочастотной СВЧ радиометрической системой с компенсацией фоновых шумов, и выполнена сравнительная оценка погрешности без компенсации и с компенсацией влияния фоновых шумов.

Ключевые слова: микроволновое зондирование атмосферы, СВЧ радиометрическая система, фоновое излучение, радиотепловое излучение, метод угломестного зондирования, влияние фоновых шумов.

ВВЕДЕНИЕ

СВЧ радиометрические измерения радиотеплового излучения атмосферы позволяют оперативно оценить ее состояние [1, 2]. Для решения задач построения пространственных моделей применяется метод угломестного зондирования атмосферы.

При выполнении микроволновых радиометрических измерений радиотеплового излучения атмосферы на разных углах места изменяется помеховый вклад во входной сигнал СВЧ радиометрической системы фонового излучения, обусловленный приемом через область рассеяния диаграммы направленности (ДН) антенны. В результате этого появляется систематическая погрешность измерений, величина которой изменяется при изменении направления зондирования.

Для уменьшения влияния фонового излучения на результаты микроволнового зондирования атмосферы разработан метод двухканального разностного приема с формированием на выходе дополнительного антенного канала сигнала, адекватного помеховой составляющей входного сигнала основного измерительного антенного канала при формировании на общей апертуре антенны двух ДН, соответствующих по распределению поля волнам H_{11} и E_{01} круглого волновода [3–6]. Разработан способ реализации метода двухканального приема на общую апертуру антенны с компенсацией влияния фоновых шумов для выполнения многочастотных микроволновых измерений [6].

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований метода угломестных измерений микроволнового излучения атмосферы при выполнении компенсации влияния фоновых шумов в СВЧ радиометрической системе с двухканальным разностным приемом на общую апертуру антенны в двухчастотных диапазонах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ УГЛОМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ПОМЕХ

Для моделирования угловой зависимости антенной температуры $T_a(\theta)$ наземной СВЧ радиометрической системы при выполнении угломестных измерений радиояркости температуры атмосферы для учета влияния изменения относительного положения углового распределения радиояркости температуры атмосферы и ДН антенны было применено уравнение антенного сглаживания с учетом пространственной формы ДН и угловой зависимости радиояркости температуры атмосферы [7]. Для расчета антенной температуры СВЧ радиометрической системы предположили выполнение условия однородности атмосферы и подстилающей поверхности, а также осесимметричность ДН антенны, что позволило перейти от телесного угла к углу плоскостного сечения ДН антенны. Следовательно,

$$T_a(\theta) = \int_0^{\pi} F(\theta - \varphi) T(\varphi) d\varphi + T_m \int_{\pi}^{2\pi} F(\theta - \varphi) d\varphi, \quad (1)$$

где $F(\theta)$ – нормированная ДН по мощности;

$T(\varphi)$ – угловая зависимость радиояркости температуры атмосферы;

T_m – радиояркость температуры подстилающей поверхности.

В выражении (1) изменение относительного положения антенны и атмосферы при смене угла визирования учитывается в первом слагаемом – свертке ДН антенны и угловой зависимости радиояркости температуры атмосферы, а прием радиотеплового излучения подстилающей поверхности из нижнего полупространства определен вторым слагаемым.

Для выявления предельных условий метода угломестных измерений микроволнового излучения атмосферы с компенсацией влияния фоновых шумов в выражении (1) принято, что КПД антенны равен единице.

Для исследования эффективности применения метода двухканального разностного приема с формированием сигнала компенсации на выходе дополнительного антенного канала для компенсации влияния фонового излучения на результаты угломестных измерений микроволнового излучения атмосферы было выполнено моделирование угловой зависимости антенной температуры при приеме излучения на круглую плоскую апертуру на двух модах H_{11} и E_{01} – T_{aH11} и T_{aE01} при задании теоретической зависимости величины радиояркости температуры однородной атмосферы и однородного излучения подстилающей поверхности с радиояркостью температурой T_m . Тогда

$$T(\varphi) = T_3 / \sin \varphi, \quad (2)$$

где угол φ отсчитывается от горизонта, а T_3 – радиояркость температуры атмосферы в зените.

Погрешность угломестных измерений радиотеплового излучения однородной атмосферы определялась как относительная разность антенной температуры и радиояркости температуры атмосферы при заданном угле визирования $T(\theta)$, задаваемая выражением (2): для одноканального приема (без компенсации фоновых шумов) и двухканального (с компенсацией фоновых шумов) приема она определяется соответственно как

$$\delta_1(\theta) = (T_{aH11}(\theta) - T(\theta)) / T_3, \quad (3)$$

$$\delta_2(\theta) = (T_{aH11}(\theta) - T_{aE01}(\theta) - T(\theta)) / T_3, \quad (4)$$

где $T_{aH_{11}}(\theta)$ и $T_{aE_{01}}(\theta)$ – антенная температура микроволновой радиометрической системы при приеме на волнах H_{11} и E_{01} соответственно, при угле визирования θ .

Для оценки эффективности компенсации влияния фоновых шумов при выполнении двухканальных измерений на волнах H_{11} и E_{01} микроволновой радиометрической системой в задачах угломестных измерений радиояркостной температуры атмосферы анализировалась разность относительных погрешностей измерений при двухканальном и одноканальном приеме

$$\delta_T(\theta) = \delta_2(\theta) - \delta_1(\theta). \quad (5)$$

На рис.1 показаны результаты моделирования разностной погрешности $\delta_T(\theta)$ для двух размеров круглой приемной апертуры радиусом 250 и 1200 мм, что соответствует размерам раскрыва рупорной и зеркальной антенн многочастотной СВЧ радиометрической системы, с помощью которой были получены экспериментальные результаты угломестных измерений мощности радиотеплового излучения атмосферы.

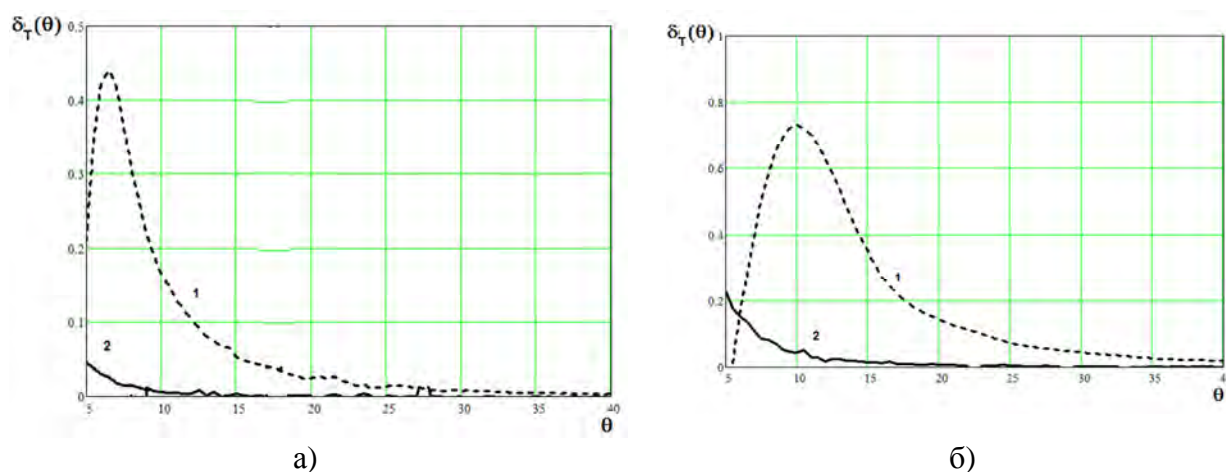


Рис.1. Разностная погрешность угломестных измерений радиояркостной температуры однородной атмосферы при одноканальном и двухканальном приемах на апертуру радиусом 250 мм (1) и 1200 мм (2) на длинах волны 3,2 см (а) и 7,5 см (б)

Выполненное моделирование предполагает калибровку результатов измерений по значению антенной температуры в зените, что изначально учитывает систематическую погрешность, связанную с сглаживающим действием антенны. Выполненные расчеты позволяют оценить вклад в погрешность измерений составляющей антенной температуры, обусловленной приемом фонового излучения по области рассеяния диаграммы направленности антенны при одноканальном приеме (без компенсации влияния фоновых шумов) и двухканальном разностном приеме (с компенсацией влияния фоновых шумов).

Результаты моделирования показали заметное снижение величины погрешности измерений при выполнении двухканального разностного приема с компенсацией фоновых шумов в области малых углов места, где влияние изменения вклада фоновых шумов значительно, так как через ближние боковые лепестки ДН антенны принимается радиотепловое излучение подстилающей поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДА УГЛОМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Экспериментальные угломестные исследования радиотеплового излучения атмосферы выполнялись трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой. Прием радиотеплового излучения осуществляется в двух частотных диапазонах (7,5 и 3,2 см) на одну зеркальную или рупорную антенну с частотным разделением в облучателе при организации дополнительного приемного канала с формированием сигнала компенсации фоновых шумов в диапазонах 7,5 и 3,2 см.

Результаты многочастотных СВЧ радиометрических исследований безоблачной атмосферы (с метеопараметрами приземного слоя – температурой T , давлением P и влажностью H) с изменением угла высоты от 15° до 90° (зенит) представлены на рис. 2 и 3.

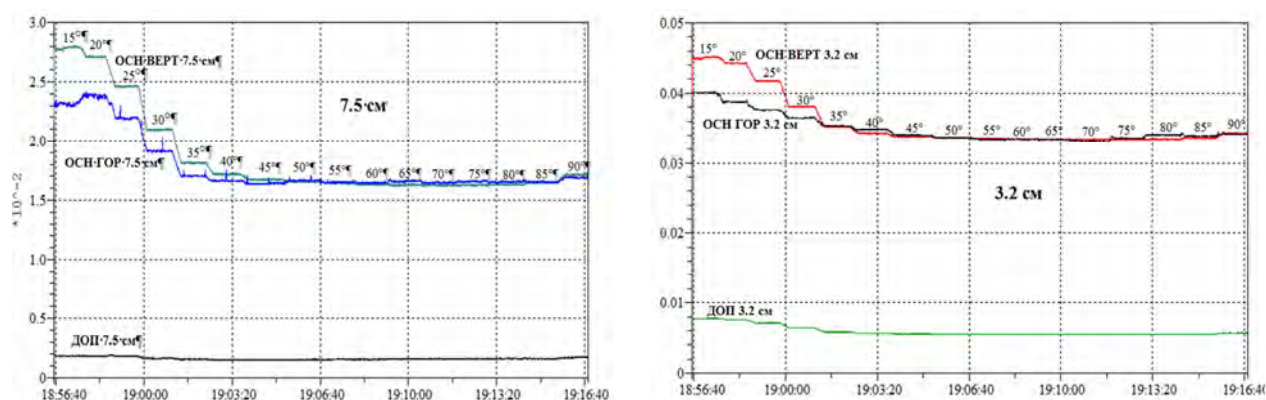


Рис.2. Временные диаграммы выходного напряжения СВЧ радиометрической системы с двухканальным разностным приемом при выполнении угловых измерений радиотеплового излучения безоблачной атмосферы (24.03.2018 с 18:56 по 19:17, метеорологические параметры: $T = -4,8^\circ\text{C}$, $P = 749,3$ мм. рт. ст., $H = 55\%$) при приеме на зеркальную антенну с радиусом раскрытия 1200 мм

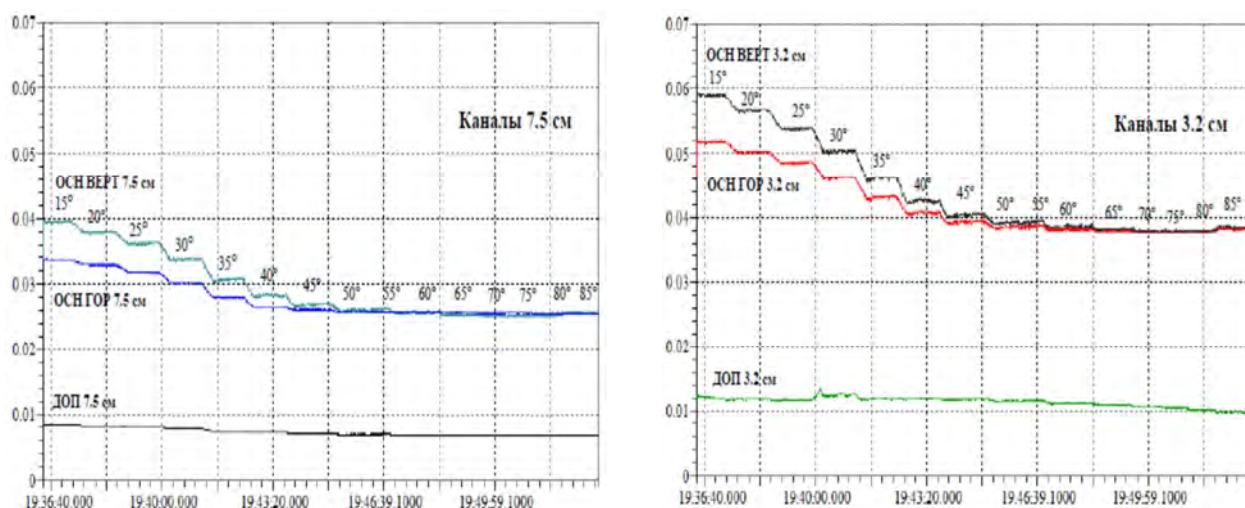


Рис.3. Временные диаграммы выходного напряжения СВЧ радиометрической системы с двухканальным разностным приемом при выполнении угловых измерений радиотеплового излучения безоблачной атмосферы (30.03.2018 с 19:36 по 19:50, метеорологические параметры: $T = -3,5^\circ\text{C}$, $P = 757,2$ мм. рт. ст., $H = 42\%$) при приеме на рупорную антенну с радиусом раскрытия 250 мм

Общий характер изменения выходного сигнала СВЧ радиометрической системы при угломестных измерениях радиотеплового излучения атмосферы (рис. 2 и 3) соответствует классической зависимости радиояростной температуры атмосферы от угла места (2).

Для сравнительной оценки погрешности одноканального и двухканального приемов в микроволновой радиометрической системе с целью исключения влияния шумов приемника и собственных шумов антенны в качестве численной величины, характеризующей нормированную антенную температуру, принималась разность выходных сигналов для текущего угла визирования θ и для зенита $\theta = 90^\circ$, нормированных к разности сигналов при приеме на углах визирования $\theta = 30^\circ$ и $\theta = 90^\circ$. Тогда

$$\frac{T_{азмН11}}{T_з} = \frac{U_{осн}(\theta) - U_{осн}(90^\circ)}{U_{осн}(30^\circ) - U_{осн}(90^\circ)}, \quad (6)$$

$$\frac{T_{азмE01}}{T_з} = \frac{U_{доп}(\theta) - U_{доп}(90^\circ)}{U_{осн}(30^\circ) - U_{осн}(90^\circ)}, \quad (7)$$

где $U_{осн}(\theta)$ и $U_{доп}(\theta)$ – выходные сигналы микроволновой радиометрической системы при приеме по основному (на волне H_{11}) и дополнительному (на волне E_{01}) каналам.

Далее, оценка разностной погрешности для одноканального и двухканального приемов осуществлялась по формулам (3) и (4).

На рис. 4 показаны результаты оценки погрешности измерений микроволнового излучения однородной атмосферы многочастотной радиометрической системой по данным измерений, представленным на рис. 2 и 3.

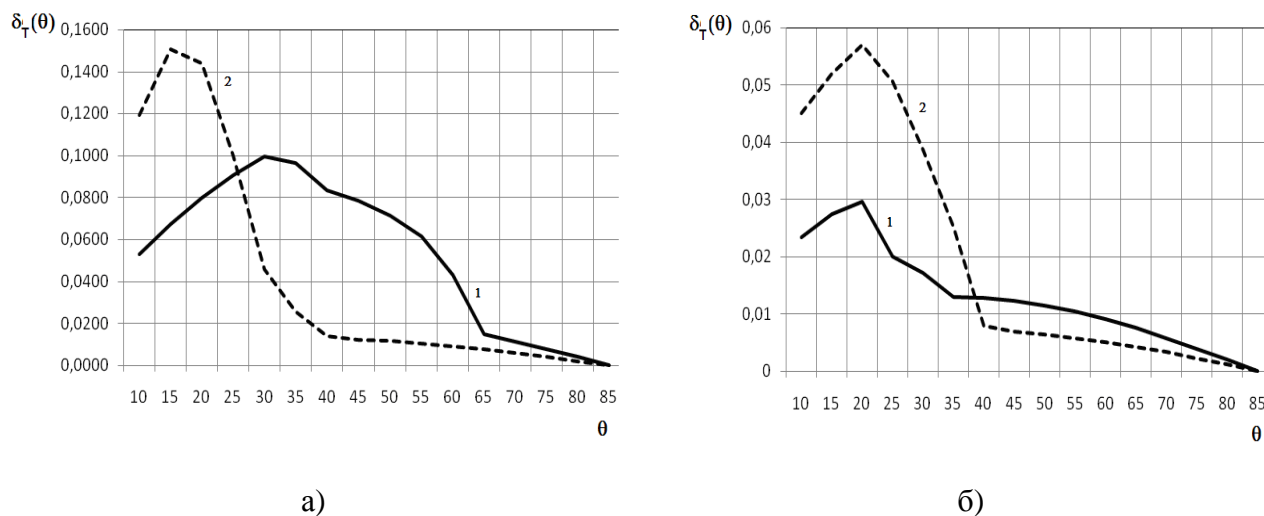


Рис.4. Разностная погрешность экспериментальных угломестных измерений радиотеплового излучения однородной атмосферы при одноканальном и двухканальном приемах на апертуру радиусом 250 мм (1) и 1200 мм (2) на длине волны 3,2 см (а) и 7,5 см (б)

Данные измерений подтвердили необходимость выполнения компенсации влияния фоновых помех при малых углах места, где уровень выходного сигнала дополнительного канала возрастает относительно стабильного уровня при больших углах места.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прием фонового радиотеплового излучения подстилающей поверхности через неизолированную область ДН антенны с относительно большим коэффициентом передачи для данной

угловой области приводит к погрешности измерения радиояростной температуры атмосферы при малых углах места, что сужает угловой сектор угломестных измерений в приземной части атмосферы.

СВЧ радиометрическая система с двухканальным приемом и компенсацией влияния фоновых шумов позволяет уменьшить погрешность измерений при выполнении разностного двухканального приема при малых углах места. Полученные результаты показали возможность уменьшения погрешности до 15% на длине волны 3,2 см и до 5% на длине волны 7,5 см. Наиболее заметное снижение погрешности в случае двухканального разностного приема по сравнению с одноканальным приемом при угломестных измерениях радиотеплового излучения однородной атмосферы наблюдается в области углов места от 10 до 20°.

Различие в величинах разностной погрешности угломестных наблюдений на длинах волн 3,2 и 7,5 см при приеме на общую апертуру антенны обусловлено более выраженными пространственно селективными свойствами антенны на длине волны 7,5 см.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность повышения точности угломестных измерений радиотеплового излучения атмосферы на малых углах места при реализации двухканального разностного метода в многочастотной СВЧ радиометрической системе с приемом в двухмодовом режиме на общую апертуру антенны.

Список используемых источников

1. *Щукин Г.Г., Степаненко В.Д., Снегуров А.В.* Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2010. – № 561. – С. 223–241.
2. *Некос А.Н., Некос В.Е., Щукин Г.Г.* Дистанционные методы исследований природных объектов: моногр. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 319 с.
3. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростоккина // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – №1(13). – С. 50–62.
4. *Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.* Сверхвысокочастотная радиометрическая система с внешним тестовым шумовым сигналом // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 653. – С. 204–209.
5. *Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г.* Оценка условий приема в двухканальной СВЧ радиометрической системе по внешнему тестовому сигналу // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск, 2016. – Т. 59, №12/3. – С. 116–120.
6. *Ростокин И.Н., Федосеева Е.В.* Вопросы построения многочастотной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – №1(17). – С. 5–12.
7. *Цейтлин Н.М.* Антенная техника и радиоастрономия. – М.: Сов. радио, 1976. – 352 с.

А.Х. Аджиев*,
доктор физико-математических наук, профессор;

М.Ю. Беккиев*,
доктор физико-математических наук, профессор;

А.С. Болдырев**;

В.А. Кузьмин*

* Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

** Южный федеральный университет, г. Таганрог

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ ГРОЗОВЫХ ЯВЛЕНИЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ АВИАЦИИ

Предложена методология оповещения о грозовой опасности, основанная на измерениях напряженности электрического поля атмосферы и данных о молниевой активности. По регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для развития разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают абсолютных значений от $-0,2$ до $+0,2$ кВ/м, то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от $-0,2$ кВ/м и менее и при $+0,2$ кВ/м и более следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от -2 кВ/м и менее и при $+2$ кВ/м и больше – наземные молнии.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, молнии, гроза, грозоуплотнитель, авиация, плотность разрядов на землю в год.

ВВЕДЕНИЕ

Средние широты России в силу своего географического положения имеют высокую активность грозовой деятельности – до 200–250 дней с грозой [1]. Плотность разрядов на землю в год может составлять более 5 разрядов/км².

Такая высокая молниевая активность создает проблемы электромагнитной совместимости, а также в хозяйственной деятельности. К примеру, авиация, связь, система электроснабжения и другие сферы жизнедеятельности испытывают негативное воздействие грозовых явлений.

Существуют системы локализации гроз, основанные на информации о молниях «облако-земля» [1–4], другие используют данные о полной молниевой активности [5, 6]. Часто информацию о напряженности электрического поля атмосферы включают в технологию предупреждения о грозах [7]. Для этих целей также используется радиолокационная и спутниковая информация [8, 9].

Совершенствование методов комплексного мониторинга грозовых процессов предполагает наращивание геофизических исследований, создание стационарных и мобильных пунктов наблюдений. Правильная организация молниезащитных мероприятий и своевременное обнаружение местоположения опасного явления во многих случаях позволяют избежать ущерба или существенно снизить его. Настоящая работа посвящена разработке методики предупреждения грозовой опасности, основанной на интегрированной информации значений напряженности электрического поля атмосферы в пункте мониторинга и данных о молниевой активности. В качестве возможной области использования предлагаемой методики рассматривается авиация.

МЕТОДОЛОГИЯ ОПОВЕЩЕНИЯ О ГРОЗОВОЙ ОПАСНОСТИ

Созданы несколько международных стандартов систем грозового оповещения для авиации. В частности, Европейский Комитет Электротехнической Стандартизации – CENELEC

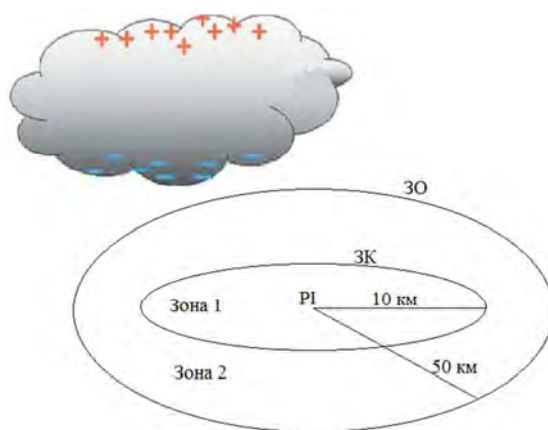
(European Committee for Electro technical Standardization) опубликовал стандарт EN50536 [10] – Защита от молний – Система грозового оповещения (Protection Against Lightning–Thunderstorm Warning Systems). Цель создания стандарта заключается в предоставлении информации о характеристиках системы грозового предупреждения и информации для оценки полезности данных о молниях в режиме реального времени и для реализации мер по предотвращению молниевой опасности.

В России действует нормативный документ [11], в котором регламентированы действия по метеорологическому обеспечению гражданской авиации. В последние годы наблюдается увеличение интенсивности воздушных перевозок и частоты возникновения опасных метеорологических явлений, связанных с конвективной облачностью, что делает актуальной задачу создания системы оперативного мониторинга за их развитием по трассе движения воздушных судов.

Об особой уязвимости авиации вследствие воздействия грозových явлений свидетельствует ряд актуальных публикаций [12, 13]. Исходя из проведенного в этих работах анализа, делается вывод о необходимости разработки новых технологий грозового оповещения.

При организации предупреждений о грозах за рубежом реализована методология «метод двух зон».

Метод двух зон и совместное использование данных грозопеленгационной сети и измерителей напряженности электрического поля представлены в публикациях М. Дж. Мерфи и других работах [3, 4]. Этот метод определяет две концентрические зоны у географической точки, именуемой «Точка Интереса» (Point of Interest – PI). Зона 1, которая окружает PI, называется Зоной Касания (Area of Concern – АОС). На территории этой зоны сосредоточены высоко уязвимые любым разрядом молнии объекты, в частности система посадки самолетов, хранилища топлива и др. Примерами такой зоны являются аэропорт, ракетно-пусковой комплекс, крупный нефтеналивной танкер и др. Второй район, или Зона Оповещения (Warning Area – WA), окружает Зону Касания (АОС). Когда атмосферная активность возникает около зоны 2, должен быть запущен режим грозового оповещения и должны осуществляться меры предупреждения. В данной работе реализован аналогичный подход для мониторинга и оповещения о грозовых явлениях. В отличие от зарубежного аналога предлагается использовать и данные о молниевой активности. На рис. 1 показана схема применения метода двух зон, реализуемого в данной работе для мониторинга и оповещения о грозовой опасности.



*Рис.1. Двухзонный мониторинг грозовой опасности:
PI – Точка Интереса; ЗК – Зона Касания; ЗО – границы зоны ответственности*

Размер и масштаб ЗК – Зоны Касания и ЗО – границы зоны ответственности должны быть выбраны в зависимости от эффективности определения координат молний, точности локализации системы детектирования электрического поля и масштаба цели. В данной работе предложена технология оповещения «двух зон» на основе выходных данных измерителя напря-

женности электрического поля атмосферы и регистратора разрядов молний. Данные измерителя напряженности электрического поля в точке PI и информация, полученная грозопеленгационной сетью, позволяют создавать мультикритерии для запуска системы предупреждения для зоны 1.

Методика валидации прогнозов и предупреждения грозовой опасности, основанная на использовании измерителей напряженности электрического поля (градиента потенциала) атмосферы EFM550 [14] и грозорегистрационной сети типа LS8000 [5], может существенно повысить безопасность работы аэропортов. Она применима и при использовании аналогов данных приборов. Следует отметить, что в настоящее время грозопеленгационная сеть Росгидромета с датчиками LS8000 покрывает практически всю европейскую часть России.

Исходя из тактико-технических характеристик вышеуказанной аппаратуры предлагается радиус зоны 1, равный 10 км, и зоны 2–50 км. Измеритель напряженности электрического поля (градиента потенциала электрического поля) устанавливается в центре зон контроля (точка PI на рис. 1). В зоне 1 измеритель напряженности электрического поля может быть использован для оценивания градиента электрического поля, значение которого зависит от множества факторов, в частности от электрической структуры облака над данной зоной, разрядов молнии, типов молнии и др.

Из-за ослабления электрического поля в зависимости от расстояния реакция измерителя поля на электрические процессы в зоне 2 сводится к резким скачкам регистрируемых значений при молниевых разрядах.

Было выполнено значительное количество совместных исследований градиента потенциала и молниевой активности [15]. Исходя из проведенных исследований и выявленных критических значений напряженности электрического поля атмосферы нами сформулирована методология предупреждения грозовой опасности на основе мониторинга указанных характеристик. Предлагаемая методология предупреждения грозовой опасности представлена в табл. 1. В таблице приведены характерные значения E и информация грозопеленгационной сети для оценки грозоопасности в зоне 1.

Таблица 1

Характерные значения E и информация о молниевой активности для оценки грозоопасности в зоне 1

Значение E в точке PI	$0 < E < 200$ (В/м)	$-200 < E < 200$ (В/м)	$-400 < E < 400$ (В/м)	$ E > 400$ (В/м)
Грозовая деятельность в зоне 2	0	Разряды: облачные – да; наземные – нет	Разряды: облачные – да; наземные – да	Разряды: облачные – да; наземные – да
Грозовая деятельность в зоне 1	0	Маловероятно	Разряды: облачные – да; наземные – нет	Разряды: облачные – да; наземные – да
Дополнительные характеристики	$\frac{dE}{dt} \neq 0$	$\frac{dE}{dt} > 0$	$\frac{dN_0}{dt} > 0$	$\frac{dN_H}{dt} > 0$
Оценка грозоопасности в зоне 1	Не опасно	Не опасно	Слабая опасность	Высокая опасность

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для возникновения разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают значений от 0 до +0,2 кВ/м, то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от -0,2 до +0,2 кВ/м следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от -2кВ/м и менее и при +2 кВ/м и больше – наземные молнии. С ростом абсолютных значений градиента потенциала электрического поля атмосферы вначале имеют место разряды отрицательной полярности. При дальнейшем росте градиента при значениях больше (меньше) +3 кВ/м (-3 кВ/м) фиксируются, наряду с облачными и отрицательными, и положительные молниевые разряды. Указанные закономерности можно использовать для мониторинга грозовых явлений над особо важными молнии зависимыми объектами.

Список используемых источников

1. *Аджиев А.Х., Богаченко Е.М.* Грозы Северного Кавказа. – Нальчик, 2011. – 152 с.
2. Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data / J. Inampues, D. Aranguren, H. Torres at al // X International Symposium on Lightning Protection. – X SIPDA, Curitiba, Brasil: SIPDA, 2009.
3. *Murphy M.J.* Probabilistic early warning of cloud – to – ground lightning at an airport // 16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences. – Orlando, Florida, 2002.
4. *Clements N.C.* The warning time for cloud – to – ground lightning in isolated, ordinary thunderstorms over Houston, Texas // Master study. – Texas A&M University, 2007.
5. *Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н.* Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. – 2013. – №1. – С.5–11.
6. *Murphy M.J., Demetriades N.* The role of total lightning in thunderstorm nowcasting // Symposium on Planning, Nowcasting and Forecasting in the Urban Zone. – Tucson, Arisona, USA: VAISALA Inc, 2005.
7. Thunderstorm warning alarms methodology using electric field mills and lightning location networks in mountainous regions / J. Lopez, E. Perez, J. Herrera, D. Aranguren and L. Porras // International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Vienna, Austria, 2012.
8. *Гашина С.Б., Дивинская Б.Ш., Сальман Е.М.* Методика использования и результаты проверки численного радиолокационного критерия грозоопасных облаков // Труды ГГО. – 1968. – Вып 231, – С.24–29.
9. *Алексеева А.А., Бухаров М.В.* Спутниковый диагноз гроз по синхронной информации радиометров микроволнового и инфракрасного диапазонов // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 6. – С.30–39.
10. EN50536. Protection against lightning. Thunderstorm warning systems / European Committee for Electrotechnical Standardization. – 2010.
11. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (НМОГА-73). – Гидрометеиздат, 1973. – 137 с.
12. ACRP Report 8. Lightning – Warning Systems for Use by Airports / Airport Cooperative Research Program, Federal Aviation Administration. – USA, 2008.
13. *Uman M.A., Rakov V.A.* The interaction of lightning with airborne vehicles Progress in Aerospace Sciences 39 (2003). – P.61–81.
14. Измеритель электрического поля EFM550: Руководство пользователя. – URL: <http://www.vaisala.com>.2004 (дата обращения: 02.06.2018).
15. Исследование развития грозо-градового облака. Ч.2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облака / Ю.П. Михайловский, А.А. Синькевич, А.Х. Аджиев и др. // Метеорология и гидрология. – 2017. – №6. – С. 31–44.

М.Н. Бейтуганов*,

доктор физико-математических наук;

Х.Х. Машуков**,

кандидат физико-математических наук, доцент;

А.Н. Пивкин***,

кандидат техн. наук;

М.Х. Тлеужева**

* ФГБУ Северо-Кавказская ВС, г. Нальчик

** ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

***АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов», г. Пермь

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ НИТЯМИ

Цель исследования – разработка, создание и экспериментальная проверка нового эффективного средства для инициирования искусственных молниевых разрядов на основе бескорпусных ракетных двигателей (БКРД).

Представлены результаты натурных испытаний с БКРД, показывающих перспективность применения БКРД для инициирования искусственных молний в грозоградовых облаках с целью предотвращения таких опасных явлений, как наземные молнии, а также как средство доставки в облака частиц кристаллизующего реагента для активного воздействия на облачные процессы.

Ключевые слова: грозоградовые облака, искусственная молния, электропроводящие нити, электрическое поле, электрические разряды.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты натурных испытаний с БКРД, проведенных на научно-исследовательском полигоне «Кызбурун» в 2016–2017 годы, показывают перспективность применения БКРД для инициирования искусственных молний в грозоградовых облаках с целью предотвращения таких опасных явлений, как наземные молнии за счет низкой себестоимости изготовления и простоты использования. Ракеты с БКРД можно использовать также как средство доставки в облака частиц кристаллизующего реагента для активного воздействия на облачные процессы вместо применяемых в настоящее время наземных генераторов аэрозоля.

При использовании БКРД для инициирования молниевых разрядов поверхность стабилизатора полета покрывалась токопроводящей краской и дополнительно к ней крепились токопроводящая проволока (например, медная) или металлизированная кевларовая нить.

Очевидно, что усиление внешнего электрического поля, а следовательно, и вероятность инициирования искусственных молний для БКРД существенно повышается с использованием металлизированного кевлара (или медной проволоки) длиной в сотни метров, сматывающегося со специального устройства.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИНИЦИИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ МОЛНИЙ

Инициирование искусственных молниевых разрядов производилось ракетами с БКРД, оснащенными стабилизатором, с привязанными к ним электропроводящими нитями из металлизированного кевлара на научно-исследовательском полигоне ФГБУ «ВГИ» (высота над уровнем моря 747 м, 43,6787° с. ш., 43,4048° в. д.).

На рис.1 представлена базовая конструкция БКРД.

Для запуска БКРД в институте разработана и изготовлена трехканальная пусковая установка.

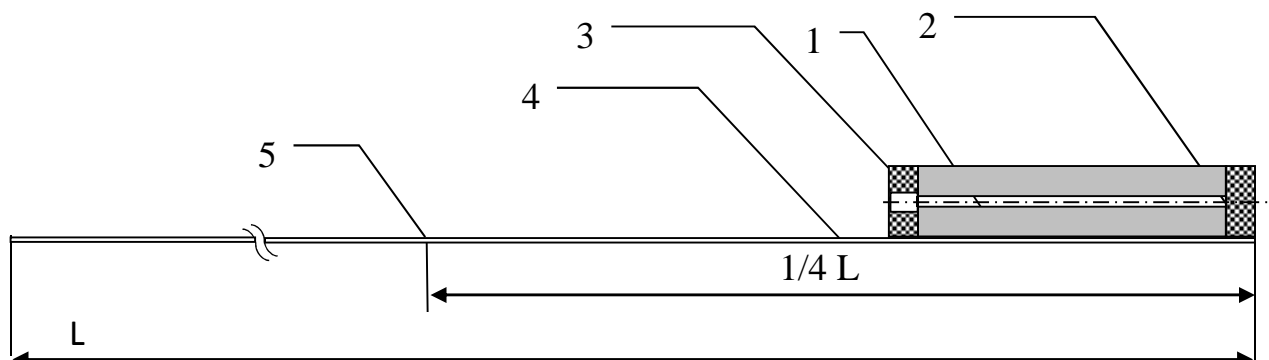


Рис.1. Базовая конструкция БКРД:

1 – пороховая шашка; 2 – несгорающая передняя крышка; 3 – сопло с центральным и периферийными отверстиями; 4 – стабилизатор полета; 5 – центр тяжести конструкции

Дистанционное управление запуском БКРД осуществлялось с помощью радиоэлектронного блока, настроенного на частоту 433 МГц. Для фиксации момента старта ракеты использовался чувствительный микрофон, расположенный непосредственно на пусковой позиции.

Ракета с БКРД для транспортировки длинного проводника под основание грозового облака снабжена стабилизатором, к которому крепится электропроводящая металлизированная кевларовая нить.

Двигатель БКРД работает 1,2 сек, а дальше ракета летит, замедляясь, по инерции до высоты 250–300 м. Для достижения больших высот полета необходимо соединять БКРД в одной связке по несколько штук. Ракеты с одним двигателем БКРД летят по баллистической траектории и падают от места запуска на расстояниях 250–300 м. С двумя двигателями БКРД ракеты поднимаются до высоты 600 м.

В процессе запуска ракеты БКРД при соответствующих значениях электрического поля у земли ($\approx 5\text{--}6$ кВ/м) ракета, несущая «заземленную» токопроводящую нить, подлетая к основанию грозового облака, вызывает «короткое замыкание» на землю. Затем нисходящий лидер проходит вниз по проводнику до земли.

Для регистрации момента пуска ракеты и параметров инициированной молнии использовалась синхронно работающая регистрирующая аппаратура в составе:

- грозопеленгационная система LS8000, для определения характеристик искусственно инициированных и естественных молниевых разрядов;

- измеритель напряженности электрического поля у земли и под грозовыми облаками при их естественном развитии и при активных воздействиях, пределы измерения канала ± 10000 В/м EFM550 Vaisala;

- измеритель тока с изолированного острия, заземленного через измерительный резистор, по падению напряжения на котором определяется фоновый ток короны у земли и под грозовыми облаками, чувствительность канала до 10^{-13} А;

- 9-канальный запоминающий USB – осциллограф;

- фото- и видеоаппаратура;

- радиоприемник «Волна-К» для регистрации ЭМИ от разрядов молний, настроенный на частоту 100 кГц;

- микрофонная система.

Основным условием успешного инициирования искусственных молний является величина электрического поля, измеренного у земли. В опубликованных результатах экспериментов указано, что для возвышенных мест необходимая величина E , обеспечивающая 70–80% успеха в инициировании молний, составляет 9–10 кВ/м, а для равнин достаточно 6 кВ/м. Другим условием является грозовая активность облака, так как при большой частоте естественных молний (более 10 ударов в минуту) трудно осуществить инициирование искусственной молнии.

Теоретическая оценка изменений напряженности электрического поля на концах электропроводящих нитей (ЭПН), аппроксимированных вытянутыми эллипсоидами, по мере опускания из облака, проведена из предположения, что проводящий эллипсоид помещен в однородное электрическое поле при предположении, что большая ось Z направлена вдоль поля, а оси X и Y перпендикулярны оси Z . Последнее позволяет оценить потенциал и напряженность электрического поля на концах спускаемого из облака эллипсоида [1].

Предполагая это поле однородным, можно показать, что если ЭПН аппроксимировать эллипсоидом вращения, то напряженность электрического поля на оси вращения E_{1z} связана с напряженностью внешнего электрического поля E_z соотношением

$$E_{1z} = E_z \frac{2e^3 \frac{a}{|z|}}{\left(\ln \frac{1+e}{1-e} - 2e \right) \left(\frac{z^2}{a^2} - e^2 \right)}, \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \quad (1)$$

где a – большая полуось эллипсоида вращения, равная $L/2$;

L – длина ЭПН;

b – малая полуось, равная радиусу ЭПН;

e – эксцентриситет эллипсоида вращения;

z – вертикальная координата, направленная вверх и отсчитываемая от середины ЭПН и удовлетворяющая условию $|z| \geq a$.

После ряда упрощений, принимая $2\varepsilon \gg \frac{b^2}{a^2}$, получим выражение

$$E_{1z} \approx E_z \frac{1}{2\varepsilon \left(\ln \frac{2a}{b} - 1 \right)}. \quad (2)$$

Проведенные по формуле (2) расчеты показали, что при изменениях длины ЭПН от 10 до 1000 м поле может усиливаться в 10^3 – 10^4 раз вблизи концов эллипсоида. Вследствие этого вблизи ЭПН будут создаваться условия, необходимые для инициирования молниевых разрядов.

Следует обратить внимание, что Л.Г. Качурин, рассматривая подъем заземленных ЭПН до высоты 300 м при отношении высоты (a) ЭПН к его диаметру ($2b$), равному 60, получил усиление напряженности электрического поля в 10^3 раз [2]. Этого вполне достаточно для вызывания локального коронного разряда в облаках в предгрозовой стадии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В летний сезон 2016 года на научно-исследовательском полигоне ФГБУ «ВГИ» нами были проведены эксперименты по инициированию искусственных молниевых разрядов из грозовых облаков.

Эксперимент 04.08.2016 года.

Время начала эксперимента 16 ч 44 мин (время московское), грозовой процесс средней интенсивности – 7-8 разрядов молний в минуту. Было произведено три пуска ракетами со

сдвоенными БКРД с металлизированными кевларовыми нитями длиной 50 м. Первые два пуска не дали результата. Третий пуск, через 10 мин 55 сек от начала эксперимента, инициировал искровой электрический разряд, сопровождавшийся характерным звуком через 4,163 сек после старта ракеты. Момент пуска ракеты и зафиксированные аппаратурой сигналы четко видны на ленте электронного самописца (рис. 2).



Рис.2. Снимок с экрана электронного самописца:
красный цвет – канал микрофона;
зеленый цвет – измеритель тока короны;
синий цвет – канал радиоприемника «Волна-К», 100 кГц

Оценка силы тока в канале искрового разряда дала значение 1–2 А.

Ток молнии (искрового разряда) J_M рассчитан по эмпирической формуле для определения амплитуды тока молнии, имеющей вид [3]

$$J_M = 10^{-2} R E_{из} [27.0 - 26.5 \exp(-0.07R)], \quad (3)$$

где J_M – амплитудное значение тока, кА;

R – расстояние до канала разряда, км;

$E_{из}$ – радиационная составляющая напряженности поля излучения, В/м.

Значения погрешностей, рассчитываемых по формуле (3) токов для наземных разрядов, не выходят за пределы $\pm 90\%$ при любых расстояниях до разряда.

Эксперимент 11.08.2016 года.

Время начала эксперимента 17 ч 34 мин (время московское), грозовой процесс средней интенсивности – 7-8 разрядов молний в минуту. Было произведено три пуска ракет со сдвоенными БКРД с металлизированными кевларовыми нитями длиной 50 м. Первые два пуска не дали результата. Третий пуск, через 1 ч 03 мин 31 сек от начала эксперимента, инициировал разряд молнии на восходящей траектории через 6,012 с полета ракеты, зафиксированный ГПС LS8000 по координатам 43,65161 с. ш., 43,39246 в. д. в 18 ч 37 м 39 сек.

Момент пуска ракеты и зафиксированные аппаратурой сигналы видны на ленте электронного самописца (рис. 3).



*Рис.3. Снимок с экрана электронного самописца:
красный цвет – канал микрофона;зеленый цвет – измеритель тока короны;
синий цвет – канал радиоприемника «Волна-К», 100 кГц*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За летний сезон 2016 года разработана методика и проведены эксперименты по инициированию искусственных молний на землю из грозовых облаков. За указанный год малыми ракетами БКРД, поднимающими заземленную металлизированную нить к основанию грозового облака, удалось инициировать один разряд молнии и один искровой электрический разряд.

Список используемых источников

1. Аджиев А.Х., Щукин Г.Г., Машуков Х.Х. Теоретическая оценка изменения напряженности электрического поля на концах сверхдлинных электропроводящих нитей // Известия КБНЦ РАН. – 2012. – №6 (50). – С. 50.
2. Качурин ЛГ. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометиздат, 1978. – 347 с.
3. Разработка методики и аппаратуры для дистанционного измерения амплитуд токов молнии: отчет о НИР, ГР №187,0004582, ин. №081290 / НИИ высоких напряжений; научный руководитель В.А. Раков. – Томск, 1988. – 34 с.

А.М. Веснин*;
С.В. Воейков*;
А.В. Киселёв*;
Г.В. Котович*;
В.И. Куркин*,
доктор физико-математических наук, профессор;
А.А. Мыльникова*;
А.В. Ойнац*;
Л.В. Чистякова*;
Ю.В. Ясюкевич***,
кандидат физико-математических наук;
* Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск
** Иркутский государственный университет, г. Иркутск

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИЕМНИКОВ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА РАДИОКАНАЛА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Проанализировано использование сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга радиоканала в квазиреальном времени. Рассмотрены проблемы, возникающие при решении данной задачи. Представлены результаты экспериментальных наблюдений на трех трассах: Хабаровск – Торы, Магадан – Торы, Норильск – Торы. Для наблюдений было использовано оборудование ИСЗФ СО РАН.

Ключевые слова: ионосфера, полное электронное содержание, МПЧ, GPS, ГЛОНАСС, ГНСС, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с непрерывным ростом требований, предъявляемых к системам связи и радиолокации, в которых используется ионосферный канал, в настоящее время актуальным становится вопрос своевременного получения информации о состоянии ионосферы [1]. Применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для задач изучения ионосферы осуществляется достаточно давно [2]. При этом основное внимание уделяется исследованиям ионосферных неоднородностей на основе относительных фазовых измерений полного электронного содержания (ПЭС). Для технических задач большой интерес представляют абсолютные измерения критической частоты [f_oF_2 в идеале – трехмерного распределения электронной концентрации (ЭК)], которые в дальнейшем могут использоваться для калибровки радиотехнических систем [3]. Оценка критической частоты на основе данных полного электронного содержания возможна либо с применением томографических методов, либо с использованием тех или иных моделей ионосферы на основе измерения абсолютного ПЭС [4]. При этом, если говорить об использовании данных ГНСС для указанной задачи, зачастую возможно применять только отдельные приемники, что приводит к невозможности реализации, например, томографических методов.

В настоящей работе рассматривается возможность функционирования отдельного приемника ГНСС для получения ПЭС и максимально применимой частоты (МПЧ) в квазиреальном времени с использованием модели IRI-Plas [5].

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МПЧ

Оценка критической частоты на основе данных ПЭС с использованием ионосферных моделей может осуществляться либо на основе коррекции глобальных параметров (входных драйверов) этих моделей, либо на основе коррекции локальных параметров в точке интереса [6].

Следует отметить, что приемник ГНСС в любой точке земного шара наблюдает не менее восьми спутников GPS/ГЛОНАСС. Наблюдения осуществляются в различных направлениях (рис. 1, левая панель). При этом большинство подионосферных точек находится на расстоянии ~200–400 км от приемника (рис. 1, правая панель).

В настоящей работе критическая частота определялась по следующей методике.

1. Получение ПЭС с использованием групповых и фазовых измерений на двух частотах ГНСС GPS/ГЛОНАСС.

2. Получение абсолютного значения ПЭС, его градиентов и временной производной [7] каждые 30 сек. С целью исключения «выбросов», которые могут возникать в результате измерений, проводится медианная фильтрация полученных временных рядов ПЭС и его градиентов с временным окном 20 мин.

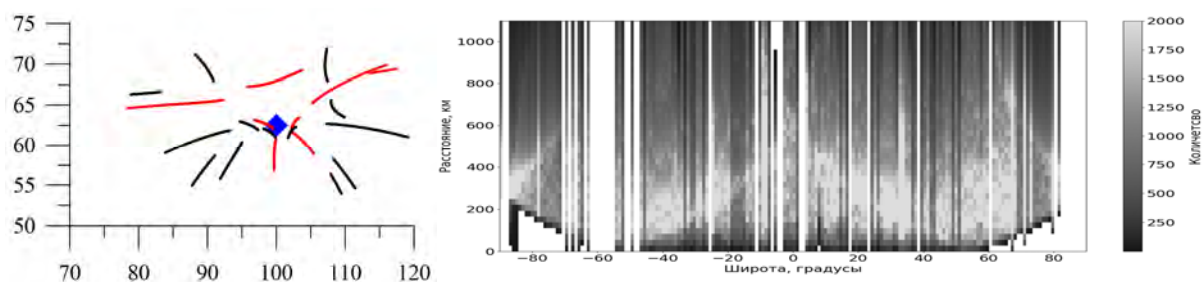


Рис.1. Подионосферные точки для систем GPS/ГЛОНАСС за один час (слева) и распределение частот встречаемости дальностей наблюдений подионосферных лучей «спутник – приемник» на различных широтах (справа). Ромбом обозначено положение выбранной станции

3. Расчет критических частот F2-слоя ионосферы над приемником ГНСС с использованием модели IRI-Plas в двух режимах: с коррекцией по измеренному ПЭС ($foF2_{GNSS}$) и без коррекции ($foF2_{IRI}$).

4. Расчет корректирующего фактора $\tau = foF2_{GNSS}/foF2_{IRI}$.

5. Расчет критической частоты в заданной точке $foF2(\theta, \varphi) = foF2_{IRI}(\theta, \varphi) \cdot \tau$, где $foF2_{IRI}(\theta, \varphi)$ – это модельное значение критической частоты над заданной точкой (θ, φ) , рассчитанное по модели IRI-Plas.

Рассчитанное в п. 5 значение критической частоты далее может быть использовано с целью коррекции ионосферных моделей и расчета МПЧ для заданной радиотрассы в случае применения одного из методов расчета характеристик распространения КВ-радиоволн. В данной работе расчет МПЧ проводился методом кривых передач (метод Смита) [8]. Метод кривых передач позволяет с достаточной точностью рассчитывать характеристики КВ-распространения на однокачковых радиотрассах (до 3000 км).

Входной характеристикой ионосферы в этом методе расчета является высотно-частотная характеристика (ВЧХ). Для восстановления ВЧХ в средней точке радиотрассы в данной работе использовалась оперативная полуэмпирическая модель ионосферы (ОПЭМИ) [9] с коррекцией по рассчитанной в п. 5 критической частоте. Возможно также использовать и более совершенные методы расчета, в частности метод нормальных волн [10], который позволяет учитывать градиенты вдоль радиотрассы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе работы было проведено исследование возможности использования приемника ГНСС, установленного в г. Иркутск (ИСЗФ СО РАН), для анализа МПЧ по результатам наклонного зондирования (НЗ) на трех наклонных трассах: Хабаровск – Торы, Магадан – Торы, Норильск – Торы. Сравнение с данными ручной обработки ионограмм представлено на рис. 2. Можно видеть высокую корреляцию полученных оценок МПЧ по данным ГНСС с реальными измерениями МПЧ на всех трех трассах. Отсутствие измерений в данных НЗ связано с поглощением на трассе (и отсутствием данных в первый день измерений на трассе Норильск – Торы).

В среднем ошибку $< 30\%$ имеют $\sim 90, 95, 85\%$ измерений на трассах Хабаровск – Торы, Магадан – Торы, Норильск – Торы соответственно.

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Перечислим основные проблемы.

1. Метод оценки МПЧ на основе данных ГНСС не учитывает поглощение на трассе. Данный факт хорошо виден на рис. 2, где ГНСС измерения присутствуют на участках, на которых данные НЗ отсутствуют.

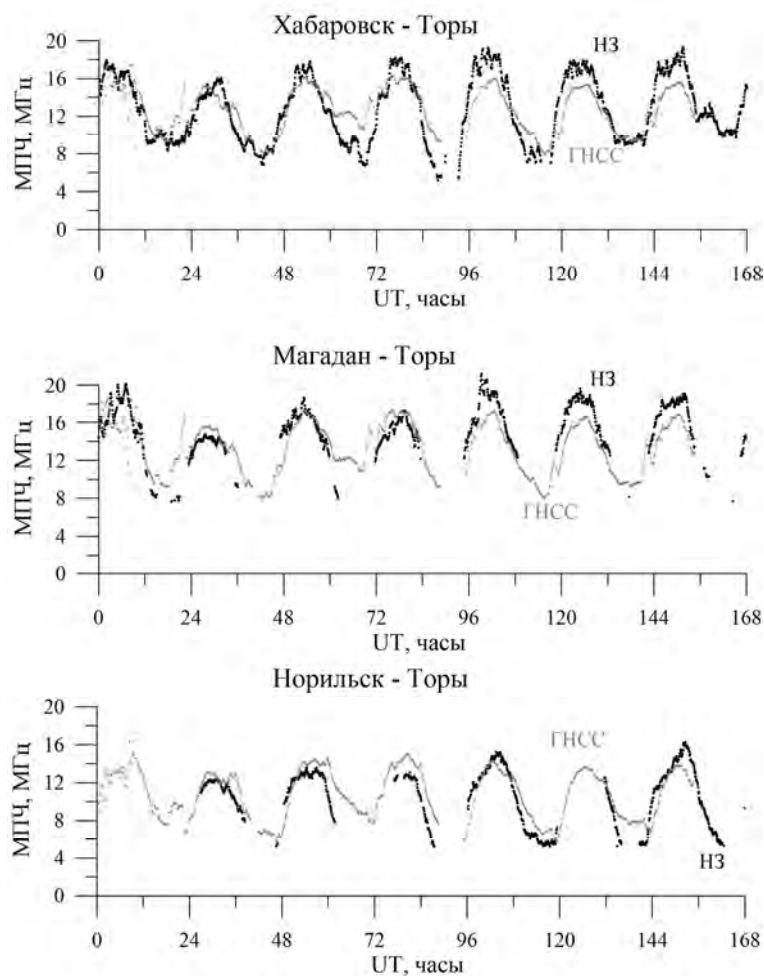


Рис.2. Динамика МПЧ по данным наклонного зондирования (НЗ, черные точки) и ГНСС (серые точки) для трасс Хабаровск – Торы, Магадан – Торы, Норильск – Торы за 7 дней

2. Безусловно, проблемой определения критической частоты является проблема соответствия модельного и реального профилей ЭК и, соответственно, взаимосвязь ПЭС и foF2.

3. При расчете МПЧ для заданной радиотрассы требуется пространственная экстраполяция измерений из точки расположения приемника ГНСС в среднюю точку. В данном случае она осуществляется на основе модели IRI-Plas. При этом реальные градиенты могут сильно отличаться от модельных, особенно в условиях прохождения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

4. Значительной проблемой является учет плазмосферы, оказывающей существенное влияние на ПЭС, но слабо влияющей на foF2. Переоценка МПЧ по данным ГНСС в ночные часы может быть связана с не воспроизводимой моделью динамикой плазмосферы.

5. Одной из существенных проблем является оценка ионосферных параметров в режиме времени, близкому к реальному. Особенно это относится к оценке градиентов ПЭС, которые могли бы использоваться для учета реальных градиентов при пространственной экстраполяции. В настоящее время методика оценки ПЭС использует историю данных за предыдущие сутки и на выходе дает ряд значений абсолютных параметров за сутки. При этом ошибки являются максимальными как раз для конца интервала (рис. 3), т.е. для момента времени наибольшего интереса.

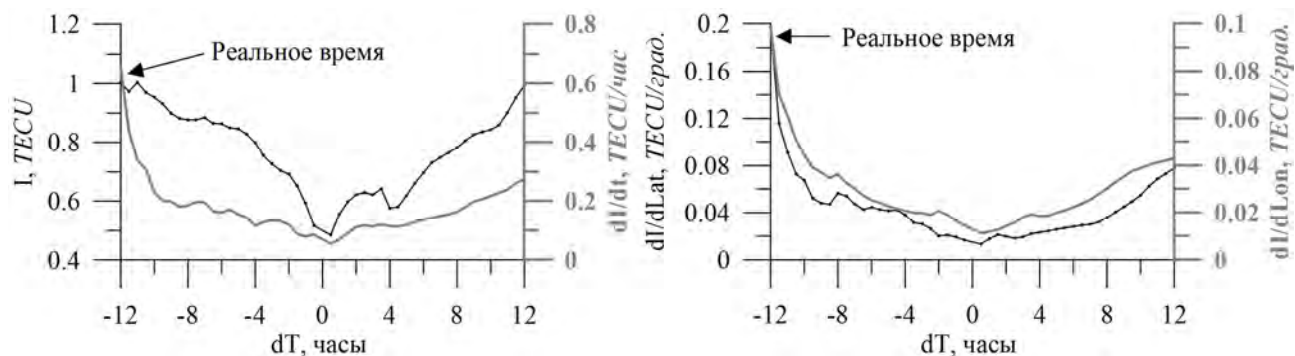


Рис.3. Ошибка определения ПЭС I (левая панель, черная кривая), временной производной ПЭС dI/dt (левая панель, серая кривая), градиентов ПЭС по широте $dI/dLat$ (черная кривая) и долготе $dI/dLon$ (серая кривая) при разном удалении от середины интервала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данных ГНСС позволяет осуществлять оценки критической частоты и МПЧ в области интересов. Одним из плюсов является стабильность измерений даже в условиях магнитных бурь. При этом существует ряд проблем, которые необходимо учитывать при использовании данных, включая особенности измерений в реальном времени.

Обработка и анализ экспериментальных данных ГНСС выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-20005). Обработка и интерпретация ионозондовых измерений выполнены в рамках базового финансирования программы ФНИ И.16. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

Список используемых источников

1. Ткачёв Г.Н. Проблема оперативного обеспечения современных средств дальней радиолокации геофизическими данными // Тезисы докладов Международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. 11–16 сентября 2017 года. – С. 7–9. –

URL: <http://bsfp.iszf.irk.ru/images/2017/Theses/Abstracts-BSFP2017.pdf> (дата обращения: 02.03.2018).

2. Review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena / E.L. Afraimovich, E.I. Astafyeva, V.V. Demyanov et al. // *J. Space Weather Space Clim.* – 2013. – Vol. 3, A27. – Doi:10.1051/swsc/2013049.

3. Real-time updating of the simplified ionospheric regional model for operational applications / B. Zolesi, A. Belehaki, I. Tsagouri, L.R. Cander // *Radio Science.* – 2004. – Vol. 39, №2. – RS2011.

4. Reconstruction of F2 layer peak electron density based on operational vertical total electron content maps / T. Gerzen, N. Jakowski, V. Wilken, M.M. Hoque // *Ann. Geophys.* – 2013. – Vol. 31. – P. 1241-1249. – Doi:10.5194/angeo-31-1241-2013.

5. *Gulyaeva T.L., Bilitza D.* Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model // *New Developments in the Standard Model*, NOVA Publishers. – 2012. – URL: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=35812 (дата обращения: 5.06.2018).

6. Метод компенсации ионосферной составляющей ошибки радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС / Ю.В. Ясюкевич, В.Б. Оводенко, А.А. Мыльников и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы.* – 2017. – № 2 (34). – С. 19–31.

7. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы / Ю.В. Ясюкевич, А.А. Мыльникова, В.Е. Куницын, А.М. Падохин // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 790–796. – DOI: 10.7868/S0016794015060176.

8. Определение критической частоты f_0F_2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита / Г.В. Котович, А.Г. Ким, С.Я. Михайлов и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2006. – Т.46, №4. – С.547–551.

9. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В.М. Поляков, В.Е. Суходольская, М.К. Ивельская и др. – М.: МЦД-Б, 1986. – 136 с.

10. *Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н.* Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. – М.: Наука, 1981. – 124 с.

В.Ф. Григорьев*

А.Е. Сидоренко*,

кандидат физико-математических наук;

Е.Д. Терещенко*,

доктор физико-математических наук;

П.Е. Терещенко***,

кандидат физико-математических наук

* Полярный геофизический институт, г. Мурманск

** Санкт-Петербургский Филиал ФГБНУ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова, г. Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 0,2–200 Гц

Рассмотрены результаты экспериментальных измерений магнитного поля, создаваемого наземным источником на Кольском полуострове в ближней зоне. В периоды геомагнитной возмущенности на частотах ниже 3 Гц наблюдались изменения амплитуды поля по отношению к спокойным условиям. Представлены теоретические расчеты поляризационных характеристик поля, подтверждающие наблюдаемую чувствительность крайне низких частот (КНЧ) и более низкочастотного поля в ближней зоне к состоянию ионосферы. Полученные результаты следует принимать во внимание в задачах глубинного зондирования Земли и мониторинга состояния ионосферы с применением контролируемых источников, в особенности при работах на экстремально низких частотах в областях с низкой проводимостью Земли.

Ключевые слова: крайне низкие частоты, контролируемый источник, ближняя зона, ионосфера.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно широко распространенным теоретическим представлениям, влиянием ионосферы на электромагнитное поле в ближней зоне источника в КНЧ-СНЧ диапазоне можно пренебрегать. Однако, как и в настоящей работе, в ранее проведенных экспериментах [1, 2] с применением контролируемых источников наблюдалась изменчивость характера возбуждения магнитного поля в относительной близости к передающей антенне в диапазоне КНЧ и на более низких частотах.

В статье представлены результаты исследования особенностей поведения магнитного поля в ближней зоне источника в диапазоне частот 0,2–200 Гц при различных геомагнитных условиях, а следовательно, и при состояниях ионосферы в эксперименте на Кольском полуострове.

Рассматриваемая задача является актуальной для повышения точности методов экстремально низкочастотного глубинного зондирования с применением контролируемых источников, в особенности при их расположении на низкопроводящих основаниях, когда величина скин-слоя значительна и сравнима с удалением точки измерений от передающей антенны. В частности, это важно для КНЧ источников на Кольском полуострове, которые в последние годы неоднократно использовались в экспериментах по электромагнитному зондированию Земли [1–4]. Кроме того, чувствительность поля к состоянию ионосферы благоприятна для реализации квазивертикального зондирования ионосферы на относительно небольших удалениях от источника излучения – в области с высоким соотношением сигнал-шум.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе рассматривается серия измерений, проведенных на Кольском полуострове в конце августа 2014 года.

Источник электромагнитного поля – ЛЭП 401, ориентированная преимущественно вдоль географической параллели, имеет длину 100 км. Регистрация поля производилась в обсерватории ПГИ в п. Ловозеро – на удалении порядка 100 км от антенны (рис. 1).

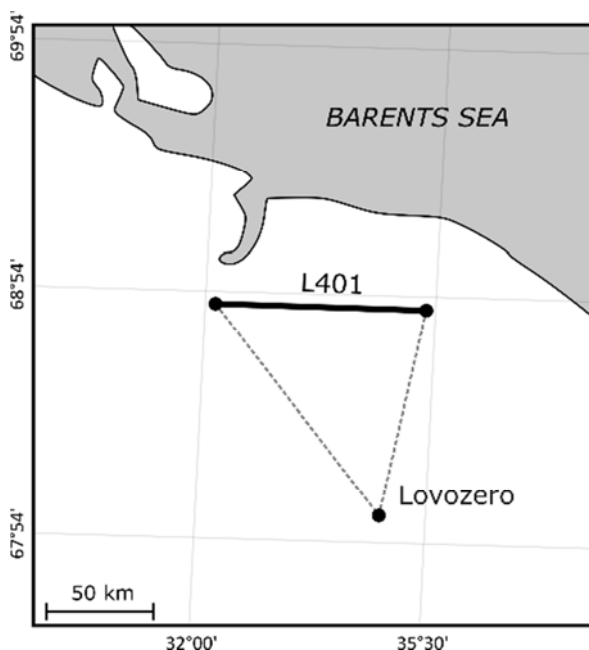


Рис.1. Карта-схема эксперимента

Амплитуда силы тока в передающей антенне в силу конструктивных особенностей передающей установки понижалась с ростом частоты – от 250 А на частоте 0,2 Гц до 25 А на частоте 200 Гц.

Для регистрации поля использовался индукционный магнитометр, два горизонтальных датчика которого ориентировались по магнитной буссоли в направлениях север-юг и запад-восток при восточном магнитном склонении 12°. Цифровая система сбора данных обеспечивала частоту дискретизации 512 Гц и имела привязку к мировому времени по сигналам спутниковых навигационных систем.

Генерация сигналов производилась с 23 по 29 августа в ночные часы (01.00-05.00 MSK). В диапазоне 0,2–200 Гц было использовано 13 частот. На частоте 0,2 Гц длительность генерации при постоянной мощности составляла 1 ч, на остальных – 10–15 мин.

Геомангнитные условия в период измерений иллюстрируются значениями К-индекса по данным обс. Ловозеро: 23–27 августа – 0-1 ед., 28-29 августа – до 5-6 ед.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка результатов измерений показала, что в первые пять дней эксперимента амплитуды зарегистрированных сигналов практически не отличались друг от друга, и только 28 и 29 августа ход кривых зависимости амплитуды от частоты ниже 3-4 Гц заметно отличался от предыдущих реализаций. Поэтому для более наглядного представления результатов измерений на диаграммах будем использовать только две показательные реализации данных, относящиеся к 23 и 29 августа (рис. 2).

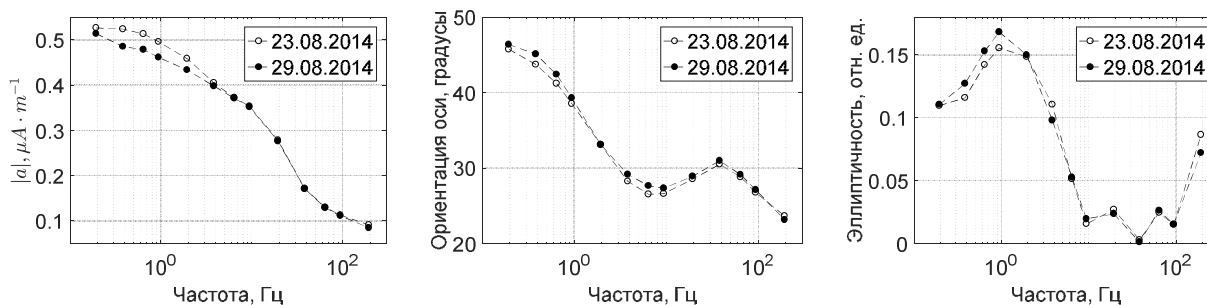


Рис.2. Поляризационные характеристики измеренного магнитного поля (слева направо): большая полуось эллипса поляризации, ориентация большой полуоси эллипса в горизонтальной плоскости в системе координат измерителя и коэффициент эллиптичности

Анализируя диаграммы на рис. 1, можно сделать вывод, что наиболее значимые вариации наблюдались на частотах ниже 4 Гц в интенсивности поля, характеризуемой величиной большой полуоси эллипса поляризации поля $|a|$. Наибольшая относительная величина вариаций составила около 8%.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе полученного ранее решения задачи о возбуждении электромагнитного поля горизонтальным заземленным диполем в плоскостной среде земля – воздух – ионосфера [5] можно выполнить расчеты магнитного поля для сопоставления с результатами экспериментальных измерений. Для этого требуется задать модель среды, включающую скалярные электрические параметры слоев и высоту ионосферы над поверхностью Земли. Отметим, что основным фактором среды, определяющим характер возбуждения поля, является удельная электрическая проводимость Земли.

Однако такой подход осложняется тем, что в широком диапазоне частот, который был использован в эксперименте, однородная модель подстилающей среды оказывается непригодной. Необходимо модифицировать модель, чтобы учесть этот фактор. В частности, можно на каждой отдельной частоте в расчетах воспользоваться эффективной проводимостью двухслойной Земли.

Поэтому на первом этапе расчетов была использована двухслойная модель Земли, которая достаточно адекватно описывала поведение поля без учета влияния ионосферы. Было установлено, что хорошее согласие с измерениями в диапазоне 0,2–200 Гц обеспечивает модель с проводимостью верхнего слоя $\sigma_1 = 6.0 \times 10^{-5}$ См/м толщиной $d = 17,5$ км. Этот слой лежит на хорошо проводящем основании с проводимостью $\sigma_2 = 1,0 \times 10^{-2}$ См/м.

Для указанной модели были определены эффективные значения проводимости для каждой из частот, применяемых в эксперименте. На рис. 3 показаны расчеты большой полуоси эллипса поляризации для этой модели, а также при использовании соответствующих эффективных значений проводимости. Определенный таким образом набор проводимостей обеспечивает достаточную для интерпретации точность расчетов поля.

В итоге такой набор эффективных значений проводимости был применен в расчетах магнитного поля в трехслойной среде земля – воздух – ионосфера. Для расчетов была выбрана высота ионосферы $h = 90$ км и два существенно различных случая – с проводимостью ионосферы $\sigma_{i1} = 1.0 \times 10^{-6}$ См/м и $\sigma_{i2} = 1.0 \times 10^{-3}$ См/м, условно моделирующие два различных состояния ионосферы.

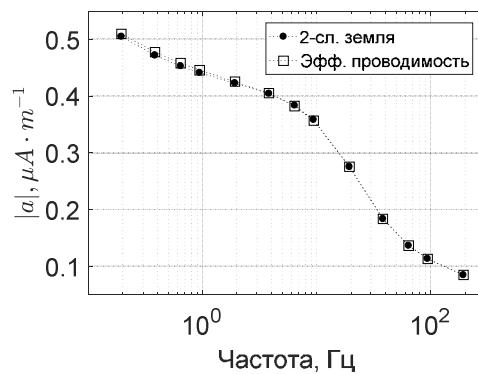


Рис.3. Теоретические расчеты поля для двухслойной Земли и для набора эффективных значений проводимости

Расчеты большой полуоси эллипса поляризации магнитного поля для двух указанных выше случаев представлены на рис. 4 в сравнении с результатами экспериментальных измерений. Также на рис. 4 показаны теоретический и экспериментальный ход кривой угла наклона большой оси эллипса, в зависимости от частоты, в измерительной системе отсчета.

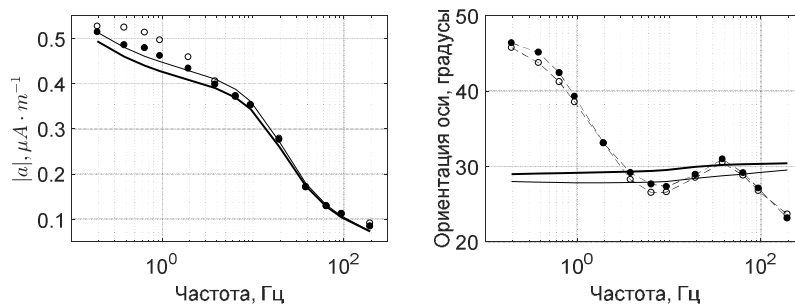


Рис.4. Поляризационные характеристики магнитного поля: большая полуось эллипса поляризации (слева) и ориентация эллипса в измерительной системе отсчета (справа).

Обозначения: жирные черные кривые – расчеты при $\sigma_i = 1,0 \times 10^{-3}$ См/м; тонкие кривые – расчеты при $\sigma_i = 1,0 \times 10^{-6}$ См/м; светлые кружки – результаты измерений 23.08.2014 г.; черные кружки – результаты измерений 29.08.2014 г.

Как видим (рис. 4), значительные изменения проводимости ионосферы в условиях, близких к эксперименту, теоретически приводят к заметным вариациям уровня интенсивности магнитного поля на частотах ниже 4 Гц. В основной части КНЧ диапазона и в диапазоне СНЧ реакция на изменение параметров ионосферы практически не заметна.

Учитывая, что состояния геомагнитного поля 23 и 29 августа существенно отличались друг от друга, можно предположить, что это отражалось и на уровне электронной концентрации в нижних слоях ионосферы, т.е. изменялась и ее эффективная проводимость. В таком случае особенности поведения поля, предсказываемые теоретической моделью, качественно соответствуют наблюдаемым в эксперименте.

Систематическое отличие экспериментального хода кривой ориентации эллипса напряженности магнитного поля от теоретического на частотах ниже 4 Гц, возможно, связано с крупномасштабными горизонтальными неоднородностями Земли или с анизотропией ее глубинных слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты магнитного поля в ближней зоне наземного контролируемого источника, выполненные на основе задачи о возбуждении поля в трехслойной среде в строгой электродинамической постановке при диапазоне 0,2–200 Гц показали высокую согласованность с экспериментом. Теоретические результаты отражают качественные особенности поведения поля при значительных изменениях эффективной проводимости области ионосферы, участвующей в возбуждении поля в ближней зоне. Аналогичное поведение поля наблюдалось и в эксперименте при сравнении результатов в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях.

Показано, что на расстояниях от источника, не превышающих величины скин-слоя, влияние ионосферы на возбуждаемое поле может быть заметным. Эту не отмечавшуюся ранее особенность следует учитывать как при интерпретации результатов глубинных электромагнитных зондирований с контролируемым источником на поверхности низкопроводящих сред для экстремально низких частот, так и для развития новых методов квазивертикального зондирования состояния ионосферы в диапазоне КНЧ и на более низких частотах.

Для дальнейших исследований необходимо расширять набор экспериментальных данных, относящихся к различным геофизическим условиям, а также более широко привлекать современные численные методы, что будет способствовать более глубокому пониманию роли отдельных геофизических факторов в процессе возбуждения экстремально низкочастотного поля на малых расстояниях. На сегодняшний день основным сдерживающим фактором для увеличения числа экспериментов являются объективные технические сложности эффективной искусственной генерации полей этого диапазона частот и высокая ресурсоемкость таких работ.

Список используемых источников

1. О возможности квазивертикального радиозондирования ионосферы в крайне низкочастотном диапазоне / Е.Д. Терещенко, В.Ф. Григорьев, А.Е. Сидоренко и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т.85, вып.8. – С.471–473.
2. Влияние ионосферы на электромагнитные волны от наземного излучателя в диапазоне частот 1–10 Гц / Е.Д. Терещенко, В.Ф. Григорьев, А.Е. Сидоренко и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т.47, №6. – С.855–856.
3. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент FENICS) / А.А. Жамалетдинов, А.Н. Шевцов, Т.Г. Короткова и др. // Физика Земли. – 2011. – № 1. – С.4–26.
4. Экспериментальные исследования сигналов в диапазоне 0.6–4.2 Гц / Е.Н. Ермакова, Д.С. Котик, Л.А. Собчаков и др. // Известия вузов. Радиофизика. – 2004. – Т.47, №8. – С. 621–628.
5. Влияние ионосферы на возбуждение электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне / Е.Д. Терещенко, П.Е. Терещенко, А.Е. Сидоренко и др. // Журнал технической физики. – 2018. – Т.88, вып.6. – С. 907–913.

Н.П. Данилкин*,
доктор физико-математических наук;
Г.А. Жбанков**,
кандидат физико-математических наук;
С.В. Журавлёв*,
кандидат физико-математических наук;
Н.Г. Котонаева*,
доктор физико-математических наук;
В.Б. Лапшин*,
доктор физико-математических наук;
А.Ю. Репин*,
доктор физико-математических наук;
И.В. Романов*,
кандидат физико-математических наук;
М.Ю. Филиппов*,
кандидат физико-математических наук;
Е.Н. Хотенко*,
кандидат физико-математических наук;
В.А. Шувалов***,
кандидат техн. наук

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

** НИИ физики Южного федерального округа, г. Ростов-на-Дону

*** ЦНИИмаш, г. Королёв

ВНЕШНЕЕ И ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ В АРКТИКЕ ПРИ НАЛИЧИИ НЕСКОЛЬКИХ БОРТОВЫХ ИОНОЗОНДОВ НА РАЗНОВЫСОКИХ ОРБИТАХ

Предложен космический мониторинг арктической ионосферы, в том числе и непрерывный многочасовой мониторинг арктических неоднородностей, методами наклонного внешнего радиозондирования и методом трансionoсферного радиозондирования.

Ключевые слова: ионосфера, Арктика, ионозонд, радиозондирование.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ ситуации с проведением оперативного мониторинга ионосферы арктического региона для целей КВ-радиосвязи, как и интересы развития научного понимания сложных процессов образования, жизни и диссипации ионосферных неоднородностей в Арктике, требует применения комплекса спутниковых средств на разных орбитах. Основная причина этого заключается в том, что непрерывное – в течение времени существования – радиозондирование (просвечивание вблизи границы радиопрозрачности) арктических структур возможно только с высокоэллиптических спутников (ВЭС), благодаря достаточной длительности нахождения ВЭС над исследуемой областью. Энергетические характеристики трасс зондирования при этом можно существенно улучшить, если прием сигналов вести на других спутниках, находящихся на круговых орбитах (КО) средней и низкой удаленности от поверхности Земли. В этом случае возникающие трассы исследования и диагностики ионосферы есть трассы внешнего наклонного радиозондирования между верхним и нижним

спутниками и трассы внешнего и трансionoсферного радиозондирования между нижним спутником и Землей.

Предлагается схема организации ионосферного мониторинга на базе использования из государственной программы [1] «Арктика-М» двух высокоэллиптических космических аппаратов (КА) с бортовыми ионозондами и нескольких КА с аналогичными ионозондами на круговых орбитах в диапазоне высот 600–2000 км. Будет показано, что такая схема при различном количестве КА на низких высотах практически полностью удовлетворит обе сформулированные выше задачи. Отметим, что возможны упрощение и удешевление предлагаемой экспериментальной работы, если вместо бортовых ионозондов на высоких орбитах использовать только передатчики, а на низких орбитах – только приемники. При этом режим аппаратуры должен быть следующим:

- бортовой передатчик, установленный на КА с орбитой до 40000 км, излучает зондирующий сигнал с помощью слабонаправленной антенны с диапазоном частот 1–30 МГц;
- вдоль линии, соединяющей бортовой передатчик и наземную станцию с приемником сигналов 1–30 МГц, распространяются сигналы прямого трансionoсферного радиозондирования.

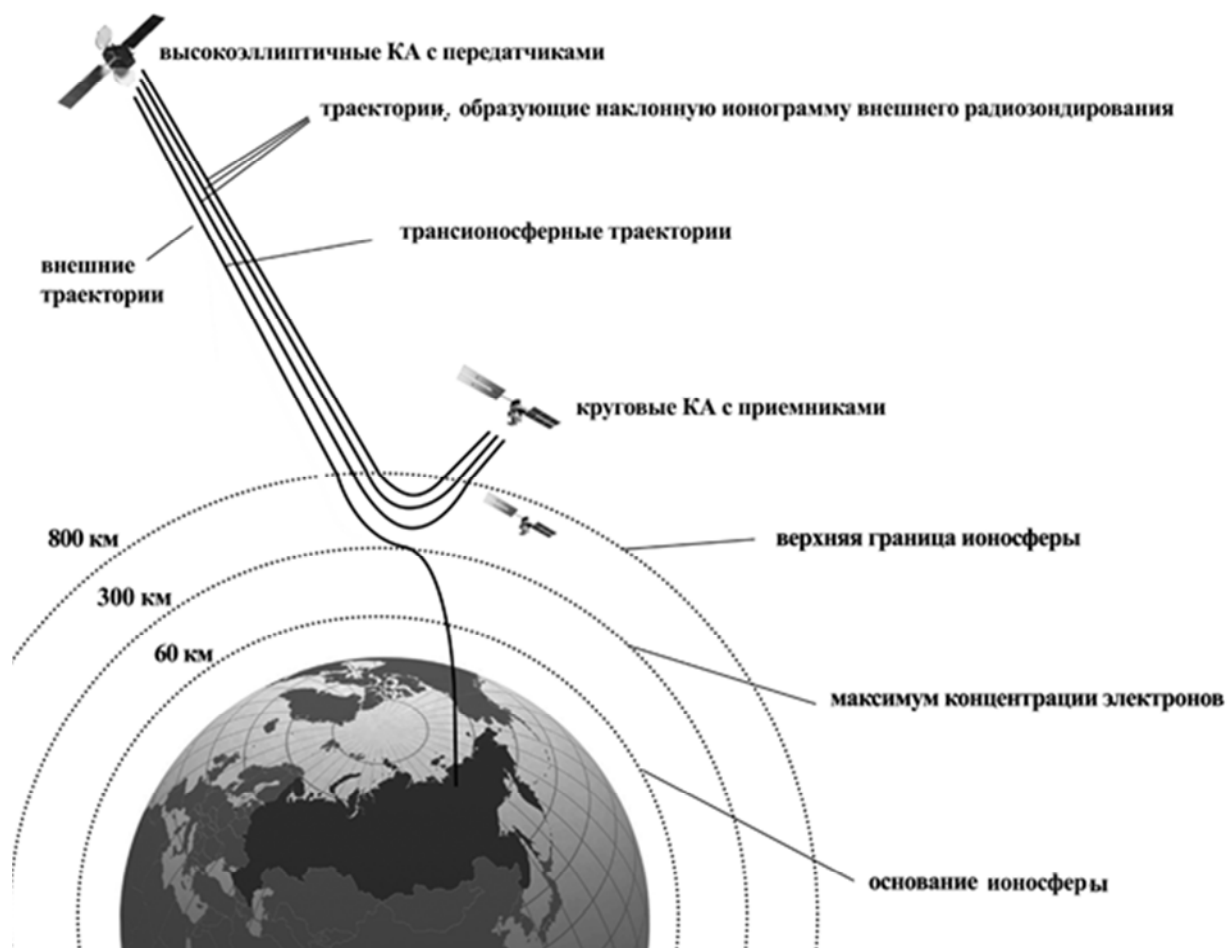


Рис.1. Схема зондирования ионосферы комплексом из двух ионозондов в режиме внешнего и трансionoсферного зондирования. ВЭО – от 15000 до 40000 км, КО от 600 до 2000 км

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

При упрощении и удешевлении космического комплекса путем установки на круговом низковысотном спутнике (КНС) только приемников, а на высокоэллиптическом (ВЭС) – только передатчиков полноценное непрерывное определение критических частот ионосферы возможно над всеми районами Арктики (полярная шапка, овал, провал). Возможно и обратное расположение трасс зондирования – передатчик на КНС, а приемник на ВЭС.

Для численного эксперимента выбраны следующие условия – модель ИПГ для 21.02.2014 г., время UT 2 ч, 0 мин. Широта и долгота ВЭС составляют 61,97 и 0,13 градусов, а высота – 38955 км. Широта и долгота КНС составляют 79,56 и 50,8 градусов, а высота – 2000 или 600 км. При этом для высоты КНС 2000 км трасса будет равна 2531 км, азимут – 21,2 градуса.

Рассматривается ионосфера в спокойных условиях, задаваемых моделью SIMP-1.

Далее и на ионограммах, и на рисунках для траекторий красным цветом обозначены прямые лучи, розовым – отраженные либо от ионосферы, либо от Земли. Для всех расчетов показаны три графика (рис. 2) – траектории на фоне контурной карты плазменных частот вдоль трассы (рис.2,а), собственно ионограммы (рис.2,б) и график величин пространственного ослабления лучей (рис.2,в).

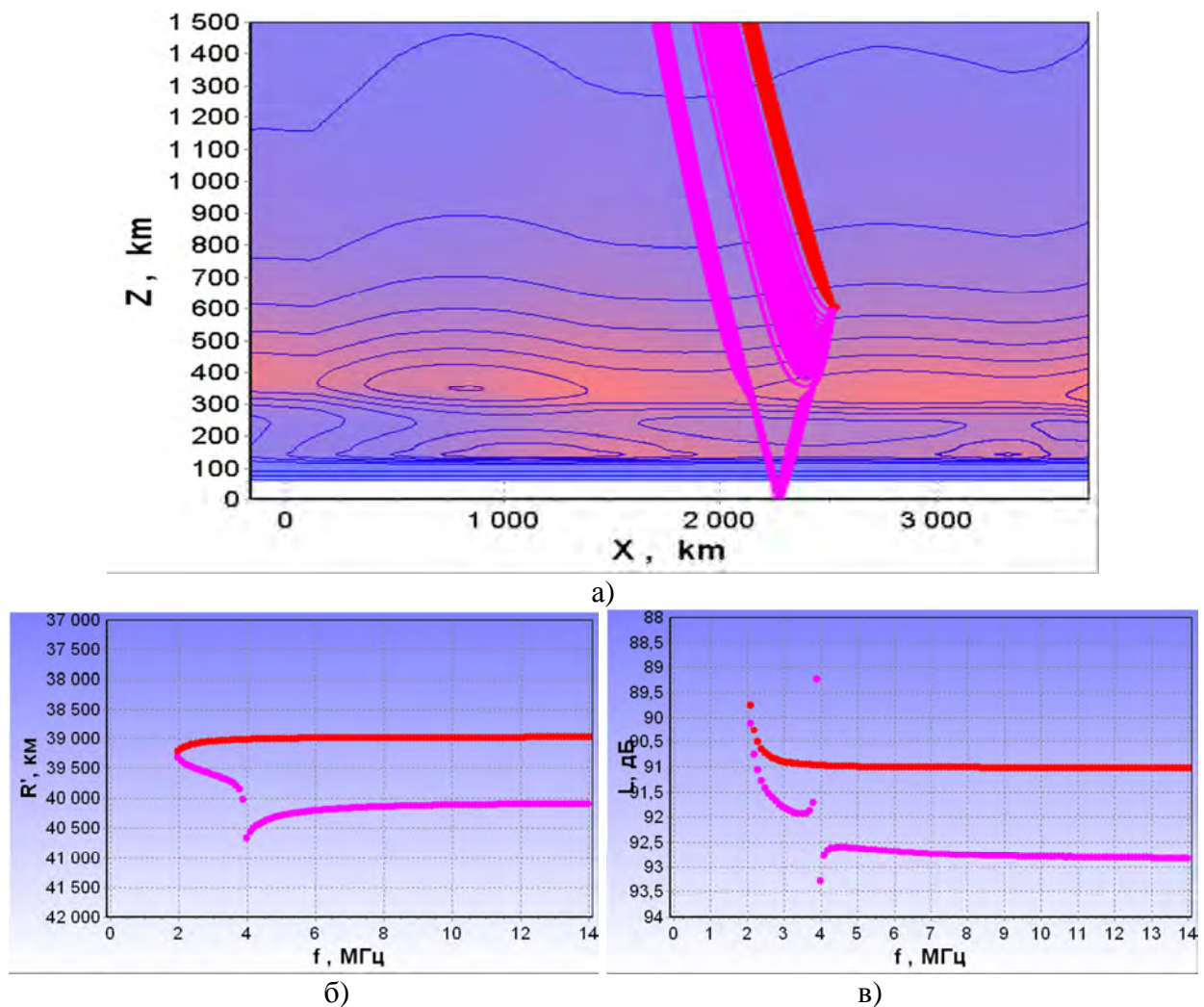


Рис.2. Модель ионосферы ИПГ.
Спокойные условия. Высота КНС $Z = 600$ км

Из указанных результатов можно сделать вывод, что в спокойных условиях мы достаточно точно можем определять критическую частоту под приемным спутником. В первом случае (низколетящий спутник) можно определить плазменную частоту на высоте приемного спутника. Она равна 2 МГц. Расчеты энергетики показывают, что прямой и отраженный лучи сопоставимы (разница не превышает нескольких децибел).

Вышеприведенный пример фактически показывает наклонное внешнее зондирование ионосферы в Арктике. Не менее интересен случай трансionoсферного зондирования (ТИЗ), когда исследующие ионосферу радиолучи проходят через все структурные особенности арктической ионосферы (полярная шапка, овал и провал) в течение длительных промежутков времени, непрерывно осуществляя ее диагностику. Далее показаны результаты расчетов ТИЗ для характерного случая наблюдения в Арктической ионосфере квазивертикальных стенок ионизации. На рис. 2 представлена модель ионосферы ИПГ, спутник находится на высоте 32700 км. Из траекторий спутников «Арктика-М» для излучения ионозонда выбраны части траекторий, при излучении с которых радиоволны при прямом трансionoсферном зондировании, будучи излученными с высот ориентировочно 10000, 20000 и 30000 км, достигают Земли в районах северных ионосферных станций России (ориентировочно Мурманск, Тикси, Диксон). В этом случае радиоволны будут пересекать исследуемые области полярной ионосферы – полярную шапку, овал и провал в широтном распределении плазмы ионосферы в диапазонах высот 100–1000 км.

На рис. 3 представлены в качестве примера результаты расчетов при расположении спутника на высоте 32701 км.

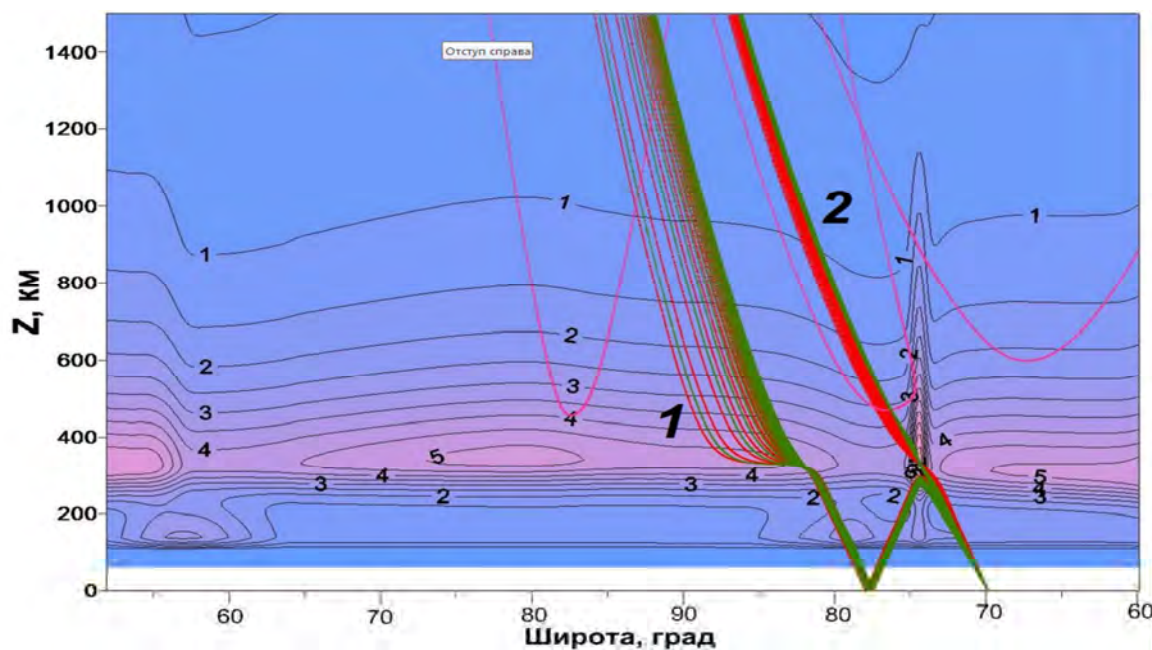


Рис.3. Распределение плазменных частот и траектории лучей при наличии стенки ионизации. Здесь красным обозначены о-лучи, приходящие в точку наблюдения, зеленым – аналогичные х-лучи

Далее были выбраны пять точек на траектории спутника «Арктика-М» через каждые два часа, и использованы соответствующие модели ионосферы в Арктике для этих времен. Неоднородность типа «стенка» расположена на 500 км севернее станции и описывается сильно вытянутым эллипсом с превышением электронной концентрации в центре над фоном, что соответствует данным реального эксперимента. На рис. 4 показана одна (из пяти) трансionoграмма (4 УТ, угол прихода 31 градус), на которой видно, что появляется второй веер лучей. Эти лучи, будучи отраженными от стенки и от Земли, излучают не только

неоднородность, но и плазму окружающего неоднородность пространства. При этом сама стенка будет своеобразным зеркалом, которое просвечивает плазменную структуру на некотором расстоянии от стенки, что хорошо видно на рис. 4.

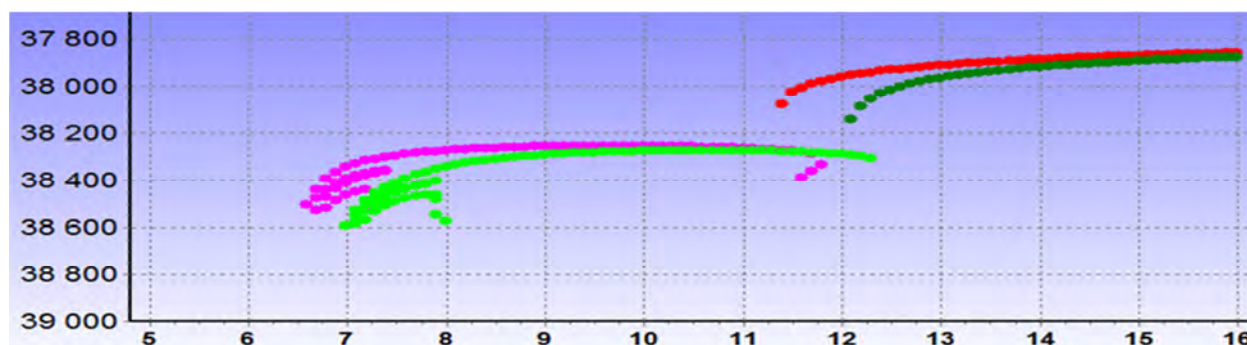


Рис.4. Одна из вычисленных трансionoграмм (виден 2-й многочастотный след, который потенциально содержит дополнительную информацию)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие плазменной стенки, по данным ТИЗ с высокоэллиптического спутника («Арктика-М» и др.), так же, как и по данным внешнего зондирования с ИСЗ «Космос-1809», уверенно определяется.

Во всех пяти случаях при высокоэллиптическом зондировании возникает отлично наблюдаемый двухскачковый многочастотный след. Наличие стенки и плазменная частота внутри стенки уверенно определяются. Спектр лучей второй моды фокусируется на высоте максимума ионосферы.

Данные зондирования с высокоэллиптического спутника могут быть основой для построения модели распределения концентрации электронов между стенкой и вертикалью, которая проходит через точку фокусирования лучей второй моды.

Список используемых источников

1. Информационное обеспечение исследования арктического региона с использованием гидрометеорологической системы «Арктика-М» / А.А. Асташкин, И.Н. Комиссарова, Т.С. Маркелова и др. // Космонавтика и ракетостроение. – 2015. – №6 (85). – С. 11–19.
2. Результаты первой научной экспедиции в приполюсном районе на атомном ледоколе «Сибирь». / Р.Л. Ахмедшин, Н.П. Данилкин, С.В. Журавлев и др. // Сборник трудов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 100–135
3. Моделирование эксперимента по радиозондированию ионосферы с ИСЗ «Космос 1809» при наличии вертикальных неоднородностей электронной плотности в арктическом регионе / М.М. Анишин, Н.П. Данилкин, С.В. Журавлев и др. // Геомагнетизм и аэрномия. – 2012. – Т. 52, №2. – С. 245–250.

Ж.В. Дашкевич*,
кандидат физико-математических наук;
В.Е. Иванов*,
доктор физико-математических наук;
Б.В. Козелов*,
доктор физико-математических наук
*ПГИ, г. Мурманск

ПОТОКИ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЕ: ДИАГНОСТИКА ПО ОПТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Возмущение верхней атмосферы под действием потоков авроральных частиц является особенностью высоких широт, учет которой необходим при решении многих прикладных задач в данном регионе. В статье рассматривается диагностика характеристик потоков авроральных электронов по данным триангуляционных наблюдений лучистых форм полярных сияний в г. Апатиты. Используется ранее разработанная численная модель прохождения потоков авроральных электронов в атмосфере Земли. Рассмотрены источники погрешности определения высотных профилей свечения и характеристик потоков электронов.

Ключевые слова: Аврора, электрон, атмосфера, триангуляционные наблюдения, полярное сияние

ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Триангуляционные наблюдения полярных сияний проводятся в Апатитах двумя синхронизированными по времени идентичными цифровыми камерами с полем зрения 18 градусов по диагонали [1].

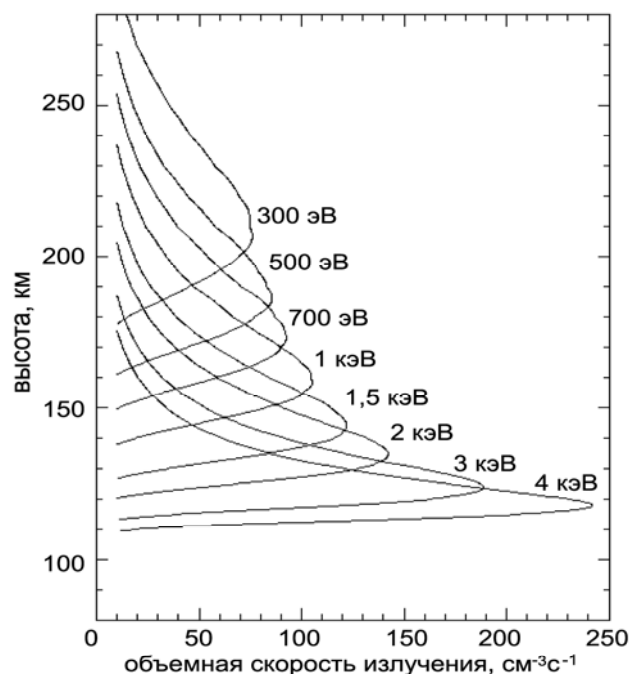


Рис. 1. Высотные профили излучения для различных начальных энергий

Пункты наблюдения разнесены на 4 км по долготе. Камеры снабжены фильтрами, выделяющими сине-зеленую часть видимого спектра [2], что позволяет отображать динамику области аврорального свечения при размере изображения 376×288 пикселей и временном разрешении один кадр в секунду. Анализировались случаи наблюдения лучистых форм полярных сияний вблизи магнитного зенита. Такие формы имеют значительную протяженность по высоте (от нескольких десятков до сотен километров), что отличает их, например, от пульсирующих пятен и однородных дуг. Идентификация уединенных лучей на полученных одновременно изображениях позволяет восстановить высотный профиль аврорального свечения [3] по их относительному смещению (параллаксу) на фоне звезд.

МОДЕЛЬ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОТОКОВ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В АТМОСФЕРЕ

По высотному профилю аврорального свечения, с использованием результатов численного моделирования, можно оценить энергетический спектр в высыпающемся потоке электронов. Высотные профили энерговыведения, ионизации и другие характеристики для известного спектра авроральных электронов могут быть рассчитаны на основе функции диссипации потока электронов в атмосфере Земли [4]. Кроме того, для корректного восстановления параметров потоков высыпающихся частиц необходимо уметь правильно рассчитывать интенсивности основных авроральных эмиссий. С этой целью была создана нестационарная по времени физико-химическая модель возбужденной полярной ионосферы, позволяющая рассчитывать концентрации основных нейтральных и ионизированных компонент и концентрацию электронов. Модель составлена на основе имеющихся в специализированной литературе данных и включает в себя 56 физико-химических реакции [5]. Входными параметрами данной модели авроральной ионосферы являются энергетический спектр авроральных электронов на верхней границе ионосферы и концентрации нейтральных составляющих атмосферы, рассчитанные по модели MSIS-90 для конкретного дня. За верхнюю границу ионосферы в случае модельных расчетов принимается высота 500 км, а в случае анализа экспериментальных данных – высота спутника, на котором измерялся спектр авроральных частиц. Таким образом, данная модель действительна для E и нижней F областей ионосферы.

Пример расчета высотных профилей излучения в линии 391,4 нм для моноэнергетичных изотропных по углам потоков электронов с потоком энергии 1 эрг/см²с и различных начальных энергий приведен на рис.1. Он дает представление о высотах, на которые проникают электроны авроральных энергий.

ПРИМЕРЫ ВЫСОТНЫХ ПРОФИЛЕЙ АВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В Г. АПАТИТЫ

На рис.2 показан пример пары изображений (интенсивности инвертированы) с пятью выделенными лучами. Соответствующие этим лучам высотные профили интенсивности свечения, приведенные к эмиссии 557,7 нм, показаны на рис.3.

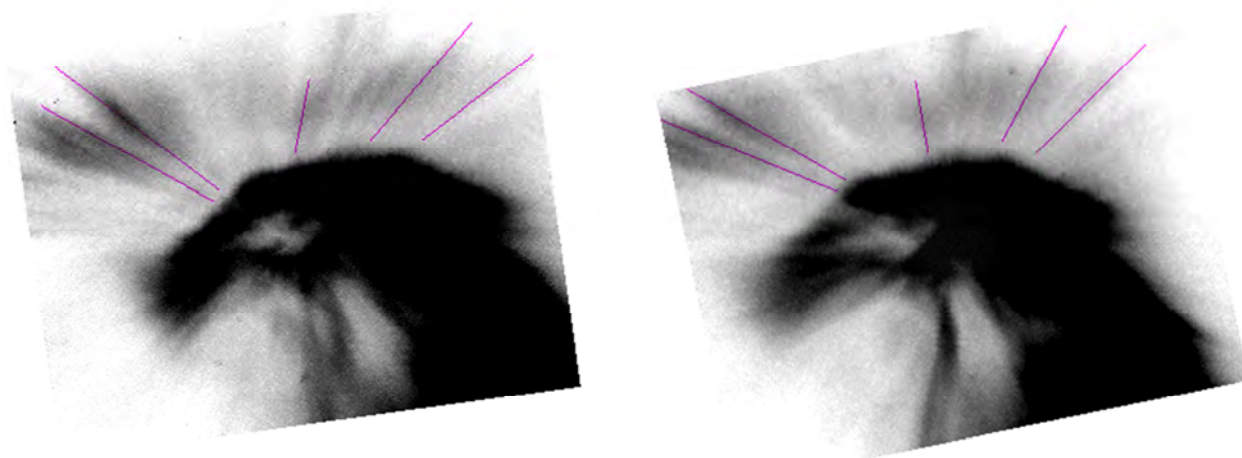


Рис.2. Пример пары изображений полярных сияний (негатив) с выделенными лучами
(09.12.2014 г. 21:05:07 UT)

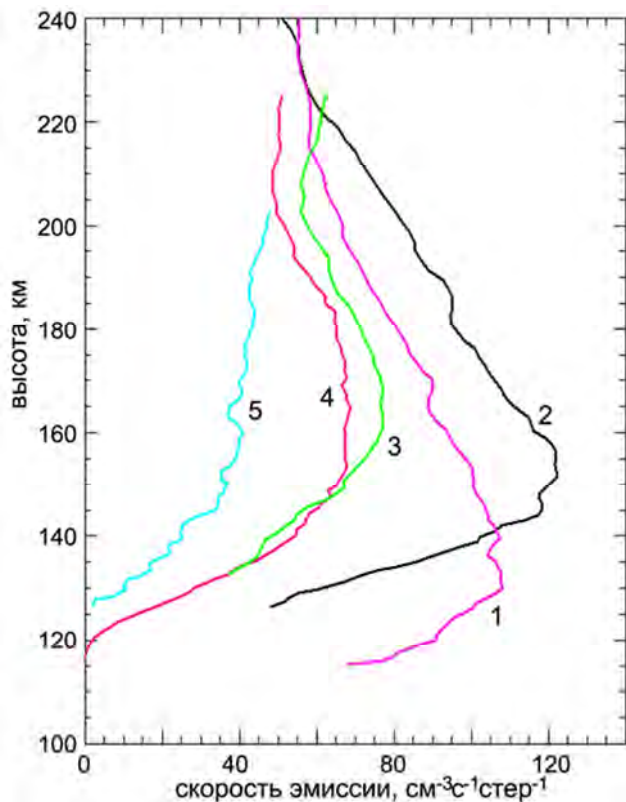


Рис.3. Высотные профили свечения, восстановленные из наблюдений

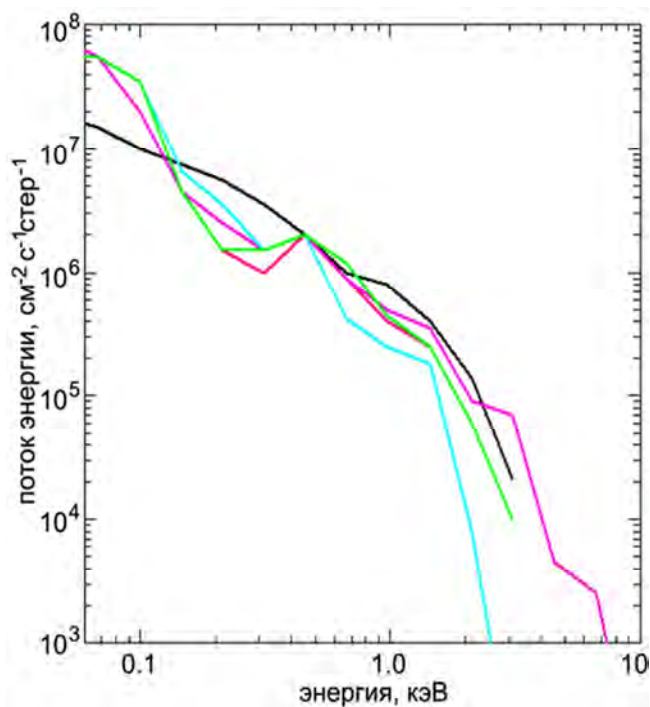


Рис.4. Энергетические спектры выпадающих электронов, определенные по высотным профилям (рис.3.)

Надо отметить, что на исходных изображениях поперечный размер лучей составляет от 3 до 6 пикселей. Для высоты 150 км 1 пиксель соответствует 100 м, т.е. наблюдаемый поперечный размер лучей – несколько сот метров.

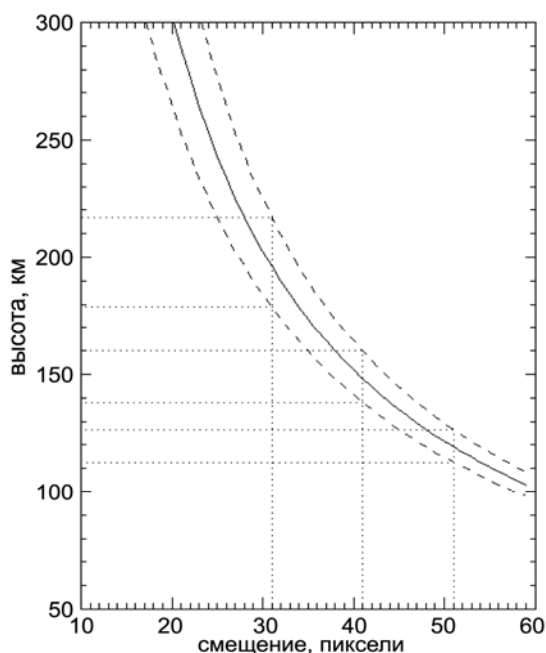


Рис.5. Оценки погрешности определения высоты по триангуляционным наблюдениям

По высотным профилям с привлечением численной модели деградации электронов в атмосфере [4, 5] оценивались спектры выпадающих потоков электронов. Полученные энергетические спектры представлены на рис.4.

Рассмотрим источники возможных погрешностей. Для определения высотного профиля аврорального свечения они будут следующие:

- «движение» лучей во время экспозиции (1 с) – менее 4 пикселя;
- поперечный размер лучей – 3–6 пикселей;
- геометрические искажения изображения – менее 2 пикселей.

В среднем погрешность определения относительного смещения соответствующих точек лучей на фоне звезд не превышает ± 3 пикселя. Пересчет относительного смещения на высоты с оценкой погрешностей представлен на рис.5.

Вклад в погрешность вносят также засветка от других источников (город, Луна) и геометрическое наложение нескольких лучей.

Для оценки погрешности восстановления спектра электронов по высотному профилю свечения необходимо учитывать, что исходные данные, заложенные в модель, известны со следующей точностью:

- состояние атмосферы (газовый состав) – неопределенность 2-3 раза;
- абсолютная калибровка камеры – 2 раза;
- спектральный состав аврорального свечения – 20–30%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье представлена диагностика характеристик потоков авроральных электронов по данным триангуляционных наблюдений лучистых форм полярных сияний с использованием численной модели прохождения потоков авроральных электронов в атмосфере Земли.

2. Приведены примеры такой диагностики с использованием данных оптических наблюдений в г. Апатиты.

3. Рассматриваются источники погрешности определения высотных профилей свечения и характеристик потоков электронов.

Список используемых источников

1. Multi-scale auroral observations in Apatity: winter 2010-2011 / B.V. Kozelov, S.V. Pilgaev, L.P. Borovkov, V.E. Yurov // Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 1, 1-6, 2012. – URL: www.geosci-instrum-method-data-syst.net/1/1/2012/ doi:10.5194/gi-1-1-2012 (дата обращения: 03.06.2018).

2. Practice of CCD cameras' calibration by LED low-light source. / B.V. Kozelov, B.U.E. Brandstrom, F. Sigernes et al. // Physics of Auroral Phenomena. – Apatity, 2013. – P. 151–154.

3. Исследования авроральных характеристик и высокоширотной структуры эмиссий верхней атмосферы и ионосферы Земли с использованием метода пространственных реконструкций изображений, полученных с высоты орбиты перспективного микроспутника / Ю.С. Доброленский, Б.В. Козелов, А.К. Кузьмин и др. // Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках: материалы научной секции солнечно-земных связей совета по космосу Российской академии наук. Сер. Механика, управление и информатика / под ред. чл.-корр. РАН А.А. Петруковича. – М.: ИКИ РАН, 2015. – С. 77–90.

4. Иванов В. Е., Козелов Б. В. Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли. – Изд-во Кольского научного центра РАН Апатиты, 2001. – 260 с.

5. Дашкевич Ж.В., Козелов Б.В. Синтетические спектры излучения некоторых систем полос сине-зеленой области спектра // Physics of Auroral Phenomena. – Apatity, 2015. – P.123–126.

В.В. Егоров*,

кандидат техн. наук;

Д.А. Коберник*;

В.А. Никольский*,

кандидат техн. наук;

В.В. Руденко*,

кандидат физико-математических наук, доцент

*ФКГУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, г. Сергиев Посад-7

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВОЛНОВОДА ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА РАСПОЛОЖЕННЫМ В НЕОДНОРОДНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ИОНОСФЕРЕ НИЗКОЧАСТОТНЫМ ИСТОЧНИКОМ

Улучшены существующие методики для аналитической оценки полей, возбуждаемых СНЧ/ОНЧ ионосферным источником в неоднородной магнитоактивной ионосфере с учетом их поляризации. В задаче использовалась модель плоскостройной ионосферы, компоненты тензора диэлектрической проницаемости которой можно экстраполировать экспонентами с различной скоростью роста на высотах до ~ 100 км и выше. Получены выражения для амплитуд поля в волноводе.

Ключевые слова: волновод Земля-ионосфера, неоднородная магнитоактивная ионосфера, СНЧ/ОНЧ ионосферный источник

Как известно, при помощи нагревного стенда (НС) можно создать ионосферный источник низкочастотного излучения, основанный на использовании эффекта Гетманцева. Исходя из физики взаимодействия модулированного коротковолнового (КВ) излучения НС с ионосферной электроструей, этот источник способен генерировать излучение в диапазоне частот от десятка герц до десятка килогерц. С практической точки зрения представляет интерес проникновение излучения от ионосферного источника в магнитосферный волновод и волновод, образованный между Землей и ионосферой. Следует отметить, что при прохождении излучения из изотропной среды (в волноводе) в анизотропную (в глубине ионосферы) происходит перестройка волны в слабоанизотропном слое, сопрягающем волновод и ионосферу. При этом кругополяризованное излучение в глубине ионосферы распадается на обыкновенную и необыкновенную волны, что делает задачу достаточно трудной. Решению этой проблемы было посвящено много работ, причем полностью решить задачу аналитически так и не удалось. Существенно, что в переходной области для рассматриваемых частот излучения геометрооптический параметр μ : $\mu \approx (k_0 l)^{-1}$ (где l – характерный масштаб неоднородности, а $k_0 = \omega / c$) порядка единицы в ОНЧ области и много больше единицы в СНЧ диапазоне, что не позволяет использовать характерные для геометрической оптики подходы типа метода Бадена или квазиизотропного приближения [1]. На больших высотах ионосфера становится сильноанизотропной, что приводит к формированию независимых нормальных волн. В то же время в задаче с ионосферным источником вблизи волновода было получено решение в работе [2] для магнитоактивной однородной ионосферы с резкой границей, а для неоднородной по высоте ионосферы без учета ее магнитоактивности – в работах [3 и 4]. Следующим шагом, позволяющим качественно улучшить в теоретическом и в прикладном отношении указанные подходы, было бы построение аналитического решения применительно к модели ионосферы, характеризующейся как неоднородностью, так и магнитоактивностью, которое позволило бы правильно учесть поляризации излучения.

Если ограничиться рассмотрением квазипродольного распространения низкочастотного излучения от ионосферного источника через магнитоактивную ионосферу (направление магнитного поля Земли вертикальное), то в декартовой системе отсчета с вертикально вверх направленной осью OZ электрическое поле \vec{E} электромагнитной волны описывается уравнением [5]

$$\Delta \vec{E} + k_0^2 \hat{\epsilon} \vec{E} - \text{grad div } \vec{E} = -4\pi i k_0 \vec{J} / c, \quad k_0 = \omega / c, \quad (1)$$

где \vec{J} – плотность сторонних токов от источника. Электромагнитные свойства ионосферной плазмы слабо изменяются в поперечном направлении, в результате чего можно ограничиться плоскостной моделью ионосферы с компонентами тензора $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}(z)$, ненулевые из которых $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}$, ϵ_{zz} , $\epsilon_{xy} = -\epsilon_{yx}$. Величина $\epsilon_{zz}(z)$ при этом соответствует значению диэлектрической проницаемости в случае немагнитоактивной среды.

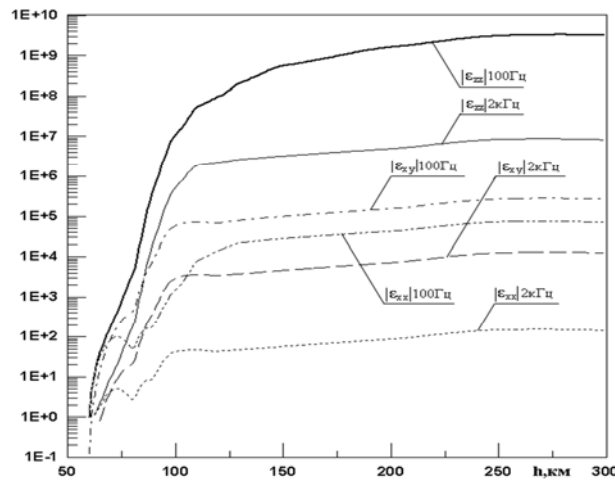


Рис.1. Типичное соотношение между величинами компонент тензора диэлектрической проницаемости на различных высотах для частот излучения 100 Гц и 2 кГц в дневных условиях

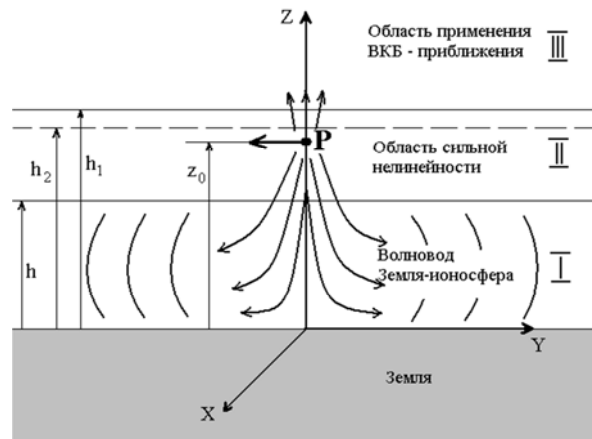


Рис.2. Расположение областей:

I – волновод Земля-ионосфера; *II* – область с находящимся в ней ионосферным источником; *III* – область, где выполняется ВКБ приближение

Типичные зависимости компонент тензора ϵ_{ij} от высоты представлены на рис. 1. Из их анализа видно, что в области выше ~ 75 – 80 км хорошо выполняется условие $|\epsilon_{zz}| \gg |\epsilon_{xy}| \gg |\epsilon_{xx}| \gg 1$, а в каждом из диапазонов высот 60–100 км и выше 100 км они могут

быть аппроксимированы экспонентами. Из этого следует, что при расчете распространения электромагнитного излучения от низкочастотного ионосферного источника можно выделить три области (рис. 2): I – волновод Земля-ионосфера ($0 < z < h$); II – переходная область с находящимся в ней ионосферным источником ($h < z < h_1$); III – где выполняется ВКБ приближение ($z > h_1$).

Воспользовавшись плоскостойкостью ионосферы, для решения системы уравнений (1) используем двойное преобразование Фурье по координатам x и y [2, 3], в результате чего для Фурье образов компонент поля \tilde{E}_x , \tilde{E}_y , \tilde{E}_z получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} (k_0^2 \varepsilon_{zz} - k_x^2 - k_y^2) \tilde{E}_z + ik_x \dot{\tilde{E}}_x + ik_y \dot{\tilde{E}}_y = 0, \quad \varepsilon_\alpha = \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}, \quad \varepsilon_\beta = \varepsilon_{xy}, \quad (2) \\ \ddot{\tilde{E}}_{x,y} + (k_0^2 \varepsilon_\alpha - k_{y,x}^2) \tilde{E}_{x,y} + (\pm k_0^2 \varepsilon_\beta + k_x k_y) \tilde{E}_{y,x} + ik_{x,y} \dot{\tilde{E}}_z = -2ik_0 \tilde{J}_{x,y} / c. \end{aligned}$$

Для системы уравнений (2) в точках $z = 0, h$, и h_1 задаются граничные условия, предполагающие совпадение тангенциальных составляющих электромагнитных полей. Решение системы уравнений (2) в волноводе при $0 < z < h$ характеризуется отсутствием источников излучения, и поскольку $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = 1$, то оно имеет вид

$$\tilde{E}_{x,y} = D_{x,y} \sin(k_z z), \quad \tilde{E}_z = -ik_z^{-1} (k_x D_x + k_y D_y) \cos(k_z z), \quad k_0^2 = k_z^2 + k_\perp^2, \quad k_\perp^2 = k_y^2 + k_x^2. \quad (3)$$

Распространение СНЧ/ОНЧ волны в ионосфере происходит преимущественно в вертикальном направлении. Это обусловлено тем, что в волноводе Земля-ионосфера горизонтальные составляющие электромагнитного поля распространяются с волновым числом, близким к ω/c ($|k_x| \approx |k_y| \approx \omega/c$), поскольку $\varepsilon = 1$. В ионосфере горизонтальные составляющие поля остаются такими же в силу выполнения граничных условий при $z = h$. В то же время вертикальная составляющая волнового вектора в ионосфере примерно на два-три порядка больше. Указанное обстоятельство позволяет в большей части областей II и III получить упрощенные уравнения:

$$\ddot{\tilde{E}}_{x,y} + (k_0^2 \varepsilon_\alpha - k_{y,x}^2) \tilde{E}_{x,y} + (\pm k_0^2 \varepsilon_\beta + k_x k_y) \tilde{E}_{y,x} = -2ik_0 \tilde{J}_{x,y} / c, \quad \tilde{E}_z = 0. \quad (4)$$

Они справедливы при выполнении соотношения $|k_x k_y| \ll |k_0^2 \varepsilon_{zz} - k_\perp^2|$, которое нарушается лишь в узком слое (порядка 5 км), примыкающем к началу ионосферы, где $|\varepsilon_{xx}|, |\varepsilon_{yy}|, |\varepsilon_{zz}| \approx 1$. Сделав в системе уравнений (4) замену переменных $G_\pm = \tilde{E}_x \pm i\tilde{E}_y$ для функций G_\pm , получим уравнения:

$$\ddot{G}_\pm + k_0^2 \varepsilon_\pm(z) G_\pm = -2ik_0 \tilde{J} e^{\mp iy} / c; \quad \varepsilon_\pm(z) = \varepsilon_{xx} \mp i\varepsilon_{xy}; \quad \text{tg} \gamma = \tilde{J}_x / \tilde{J}_y, \quad \tilde{J}^2 = \tilde{J}_x^2 + \tilde{J}_y^2. \quad (5)$$

Характер решения уравнений (5) в ионосфере определяется поведением функций $\varepsilon_\pm(z) = \varepsilon_{xx} \mp i\varepsilon_{xy}$, имеющих смысл величины $\varepsilon_j = (n + i\chi)^2$ (где j – номер слоя) для волн с комплексными амплитудами G_\pm и позволяющих интерпретировать их как обыкновенную и необыкновенную волну в магнитоактивной ионосфере. Вид функций $\varepsilon_j(z)$ (рис. 1) позволяет в каждой области j использовать для $\varepsilon_\pm(z)$ экспоненциальные аппроксимации вида $\varepsilon_\pm(z) = \varepsilon_j \exp\{z/L_j\}$, где ε_j, L_j – комплексные константы. В результате однородные уравнения для функции G_\pm преобразуются в уравнения Бесселя относительно новых переменных

$\xi_{\pm} = \xi_{0,j} \exp(z/2L_j)$ и $\xi_{\pm} = i\xi_{\pm}^*$ соответственно, где $\xi_{0,j} = 2\omega L_j \sqrt{\varepsilon_j} / c$ по аналогии с подходом в [3]. Тогда решение уравнений (5) представляется линейной комбинацией функций Бесселя и Ханкеля от аргумента ξ для функции G_+ и $i\xi^*$ для функции G_- :

$$G_+(z) = A_+ H_0^{(1)}(\xi) + B_+ J_0(\xi); \quad G_-(z) = A_- H_0^{(1)}(i\xi^*) + B_- J_0(i\xi^*). \quad (6)$$

Общее решение неоднородных уравнений (5), в области II, где отсутствует источник СНЧ/ОНЧ излучения ($z > h_2$), имеет вид уходящей волны:

$$G_+(z) = C_+ H_0^{(1)}(\xi); \quad G_-(z) = C_- H_0^{(1)}(i\xi^*); \quad \vec{E}_z = 0, \quad z > h_2. \quad (7)$$

Используя метод вариации постоянных и дипольное приближение $\vec{J} = J_g \delta(z - z_0)$ для ионосферного источника СНЧ/ОНЧ излучения, общее решение неоднородных уравнений (5), в области II, где находится источник и выполняется условие $|\varepsilon_{zz}| \gg 1$, имеет вид

$$G_{\pm}(z) = A_{\pm} H_0^{(1)}(x^{\pm}) + B_{\pm} J_0(x^{\pm}) - \frac{2\pi\omega L^{\pm}}{c^2} J_g e^{\mp i\gamma} \begin{cases} H_0^{(1)}(x^{\pm}) J_0(x^{\pm}_{z_0}), & \text{при } z > z_0 \\ H_0^{(1)}(x^{\pm}_{z_0}) J_0(x^{\pm}), & \text{при } h < z < z_0 \end{cases}, \quad (8)$$

где $x^+ = \xi$, $x^- = i\xi^*$, $L^+ = L$, $L^- = L^*$, $x^+_{z_0} = \xi_{z_0}$, $x^-_{z_0} = i\xi^*_{z_0}$ и величины ξ_{z_0} берутся в точке $z = z_0$. Для компонент магнитного поля соотношения получаются путем использования уравнения Максвелла: $\vec{H} = (-ic / \omega) \text{rot } \vec{E}$. Константы $A_{\pm}, B_{\pm}, C_{\pm}, D_{\pm}$ определяются из решения линейной системы уравнений, полученной при записи граничных условий при $z=h$ и $z=h_1$, предполагающей равенство тангенциальных компонент электрического и магнитного полей.

Решение для компонент поля осуществляется путем применения к полученному результату обратного преобразования Фурье, что позволяет получить результат в интегральном виде. Интегралы могут быть взяты с применением контурного интегрирования и теории вычетов по аналогии с подходом, используемым в [2, 3]. В результате для компонент поля E_x и E_z в области волновода получим ряд по собственным значениям в особых точках:

$$E_z = \frac{2\pi\omega}{c^2 k_z^2} J_g \left(e^{i\varphi} e^{-i\gamma} \sum_{i=1}^l \tilde{k}_{\perp i}^2 J_1(\tilde{k}_{\perp i} r) \tilde{\Phi} + e^{-i\varphi} e^{i\gamma} \sum_{i=1}^l k_{\perp i}^2 J_1(k_{\perp i} r) \Phi \right), \quad r^2 = x^2 + y^2, \quad x = r \cos \varphi$$

$$E_x = \frac{\omega\pi \sin(k_z z)}{c^2 k_z \cos(k_z h)} J_g \left(e^{-i\gamma} \sum_{i=1}^l \tilde{k}_{\perp i} H_0^{(1)}(\tilde{k}_{\perp i} r) \tilde{\Phi} + e^{i\gamma} \sum_{i=1}^l k_{\perp i} H_0^{(1)}(k_{\perp i} r) \Phi \right), \quad (9)$$

где

$$\Phi = k_{\perp i} r \left(\Lambda_3 H_0^{(1)}(\xi_{z_0}) - \Lambda_4 J_0(\xi_{z_0}) \right) \left(dG(k_{\perp}) / d(k_{\perp}) \Big|_{k_{\perp} = k_{\perp i}} \right)^{-1},$$

$$\Lambda_1 = \text{tg}(k_z h) \frac{\xi_h}{2k_z L_1} \dot{H}_0^{(1)}(\xi_h) - H_0^{(1)}(\xi_h), \quad \Lambda_2 = \text{tg}(k_z h) \frac{\xi_h}{2k_z L_1} \dot{J}_0(\xi_h) - J_0(\xi_h), \quad F_1 = \frac{L_2 \xi_{h_1}}{L_1 \xi_{h_1}^1},$$

$$\Lambda_3 = F_1 H_0^{(1)}(\xi_{h_1}^1) \dot{J}_0(\xi_{h_1}) - \dot{H}_0^{(1)}(\xi_{h_1}^1) J_0(\xi_{h_1}), \quad \Lambda_4 = F_1 H_0^{(1)}(\xi_{h_1}^1) \dot{H}_0^{(1)}(\xi_{h_1}) - \dot{H}_0^{(1)}(\xi_{h_1}^1) H_0^{(1)}(\xi_{h_1}).$$

Функции с «волной» определяются путем замены: $\xi_h \rightarrow i\xi_h^*$, а величины $k_{\perp i}$, $\tilde{k}_{\perp i}$ – как корни трансцендентных характеристических уравнений: $G(k_{\perp}) = 0$, $\tilde{G}(\tilde{k}_{\perp}) = 0$, где $G(k_{\perp}) = \Lambda_1 \Lambda_3 - \Lambda_2 \Lambda_4$, $\tilde{G}(\tilde{k}_{\perp}) = \tilde{\Lambda}_1 \tilde{\Lambda}_3 - \tilde{\Lambda}_2 \tilde{\Lambda}_4$. Решение трансцендентных уравнений проводится численным методом.

Особенность полученного решения заключается в более полном учете свойств ионосферы, существенно отличающихся в слоях, прилегающих к волноводу Земля-ионосфера, и сопряженных с верхней ионосферой. Это позволяет в верхней ионосфере, где $G_{-}(z)$ асимптотически стремится к нулю, получить зависимость между компонентами поля в виде $E_x = iE_y$, т.е. волну с круговой поляризацией, вращение в которой осуществляется в направлении вращения электрона в магнитном поле Земли. В волноводу решение формируется как обыкновенной, так и необыкновенной волной.

Из полученных оценок видно, что качественно учет влияния магнитоактивных свойств ионосферы приводит к замене в модели без учета магнитоактивности величины диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_{zz}$ на величину $\varepsilon = \varepsilon_{xx} \mp i\varepsilon_{xy}$. Поскольку графики указанных величин в нижней части ионосферы идут практически параллельно друг другу, то качественно учет магнитоактивных свойств можно свести к коррекции высоты начала ионосферы.

Список используемых источников

1. *Кравцов Ю.А., Найда О.Н., Фуки А.А.* Волны в слабоанизотропных трехмернеоднородных средах: квазиизотропное приближение геометрической оптики // УФН. – 1996. – Т.166, № 2. – С. 141–167.
2. Возбуждение волновода Земля-ионосфера ионосферными источниками низкочастотного диапазона / Н.С. Беллюстин, В.П. Докучаев, С.В. Поляков, В.В. Тамойкин // Радиофизика. – 1975. – Т. 18, № 9. – С. 1323–1332.
3. *Котик Д.С., Поляков С.В., Яшинов В.А.* Возбуждение волновода Земля-ионосфера низкочастотными источниками, расположенными в неоднородной ионосфере // Радиофизика. – 1978. – Т. 21, №7. – С. 930.
4. *Tripathi V.E., Chang C.I., Popadopoulos K.* Excitation of the earth-ionosphere waveguide by an RLF source in the ionosphere // Radio science. – 1982. – Vol. 17, № 5. – P. 1321–1326.
5. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967. – 684 с.

С.А. Желавский*;

Д.А. Коберник*;

Н.В. Лебедев*,

кандидат техн. наук;

С.А. Назаров*;

В.А. Никольский*,

кандидат техн. наук;

В.В. Руденко*,

кандидат физико-математических наук, доцент

*ФКГУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, г. Сергиев Посад-7

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Проведено изучение влияния возмущения концентрации электронов в ионосферной плазме Земли на распространение сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ) вдоль вертикальной трассы Земля-ионосфера. В качестве источника возмущения рассмотрены воздействие ядерного взрыва и работа нагревного стенда типа HAARP. Предложен метод компенсации дисперсионных искажений при распространении СШП ЭМИ в возмущенной ионосфере.

Ключевые слова: сверхширокополосный электромагнитный импульс, распространение, ионосферная плазма, возмущение, концентрация заряженных частиц, дисперсия, нагревной стенд, ядерный взрыв.

В настоящее время получили большое развитие технологии, связанные с генерацией сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ). В связи с этим активно изучаются вопросы применения СШП ЭМИ для решения задач беспроводной передачи энергии, зондирования и мониторинга химического состава атмосферы и ионосферы, а также в системах связи, телекоммуникации, локации и идентификации целей (в том числе низколежачих и использующих stealth технологии) [1, 2]. Решение представленных задач в интересах оборонной тематики зачастую может быть связано с использованием СШП ЭМИ в условиях возмущенной среды. В частности, в околоземном космическом пространстве основным параметром, оказывающим наибольшее воздействие на распространение СШП ЭМИ, является концентрация заряженных частиц и ее возмущения на траектории распространения Земля-ионосфера. Вопросу изучения влияния этих возмущений и посвящена данная работа.

Для изучения влияния возмущений концентрации заряженных частиц авторами была разработана программа расчета распространения СШП ЭМИ вдоль вертикальной траектории Земля-ионосфера. При этом рассматриваются условия, наиболее благоприятные для распространения радиочастотного излучения, при которых влиянием геомагнитного поля можно пренебречь. На практике эта ситуация может быть реализована при излучении линейно поляризованной волны в направлении, поперечном геомагнитному полю, где электрическая компонента излучаемого поля совпадает по ориентации с вектором геомагнитного поля. В этом случае среду распространения можно рассматривать как изотропную с постоянной магнитной и зависящей от высоты диэлектрической проницаемостями. Расчет распространения основывается на использовании традиционного Фурье-разложения исходного импульса с последующим решением системы уравнений Максвелла в одномерной постановке для сферической слоистой неоднородной среды. Тестирование расчетной программы проводилось по данным из работы [3] и показало высокую степень совпадения с результатами независимых авторов.

Ниже рассматриваются два возможных случая возникновения возмущений концентрации заряженных частиц. В первом случае работа нагревного стенда (НС) приводит к нагреву

электронов и вызывает изменение частоты столкновений (рис. 1,а) и сдвиг ионизационно-рекомбинационного баланса (рис. 1,б). Следует отметить, что частота столкновений электронов меняется практически мгновенно за время порядка 10^{-5} – 10^{-3} сек, а концентрация заряженных частиц – плавно за время порядка 10–30 мин. Чтобы оценить отдельно влияние нагрева частиц и изменения ионизационно-рекомбинационного баланса на распространение СШП ЭМИ были рассмотрены три случая:

- без нагрева;
- через 0,1 сек после начала нагрева (частота столкновений изменилась, а концентрация осталась прежней);
- через 20 мин (изменились и частота столкновений, и концентрация).

Данные по изменению концентрации и частоты столкновений под воздействием НС были получены на основе модели, описанной в [4]. Результаты получены для НС с характеристиками, аналогичными стенду HAARP.

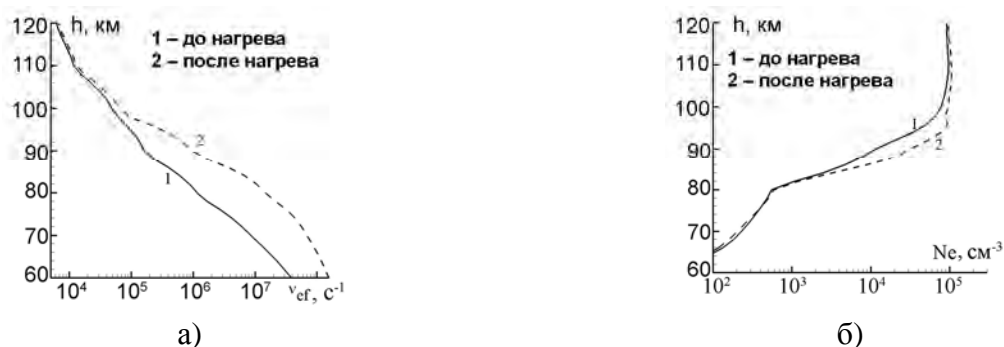


Рис.1. Частота столкновений (а) и концентрация электронов (б) в ионосфере

Вторым случаем возникновения возмущения концентрации, рассмотренным в работе, является возмущение, вызванное ядерным взрывом (ЯВ). Данные о временной динамике концентрации электронов в течение 200 мин после ЯВ взяты из открытых источников [5] для диапазона высот 75–120 км. Так, на интервале 0–25 мин происходит резкое увеличение концентрации, после чего на интервале 25–45 мин концентрация меняется незначительно. Потом происходят повторный скачок до максимума на 50-й минуте и резкий спад до минимума на 55-й минуте. Далее к 75-й минуте концентрация восстанавливается до уровней интервала 25–45 мин, и к 200-й минуте возмущение постепенно исчезает. Расчеты распространения СШП ЭМИ проводились для профилей концентрации электронов (рис. 2), соответствующих 25-й, 50-й, 55-й, 75-й, 100-й и 200-й минуте после взрыва [5].

Для примера в работе рассмотрено распространение СШП ЭМИ на высоту 100 км от поверхности Земли с амплитудно-временной формой, представленной на рис. 3, и характерными длительностями $t_i = 1$ нс и $t_r = 10$ нс.

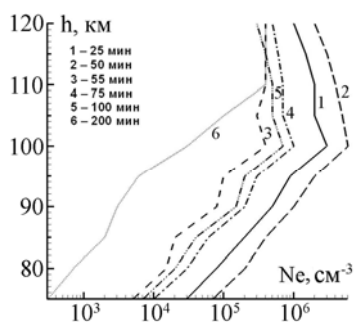


Рис.2. Возмущение концентрации электронов после ЯВ [5]

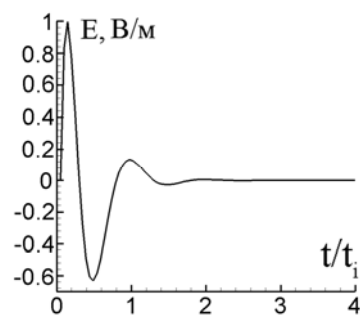


Рис.3. Начальная форма СШП ЭМИ

На рис. 4 представлены рассчитанные формы СШП ЭМИ, достигшего высоты 100 км в условиях отсутствия воздействия на ионосферу и в условиях воздействия НС с продолжительностью 0,1 с и 20 мин. Из рисунка видно, что изменение частоты столкновений, вызванное применением НС, практически не влияет на форму СШП ЭМИ. Возмущение же концентрации частиц изменяет форму импульса, но энергетика НС не достаточна для создания сильного эффекта.

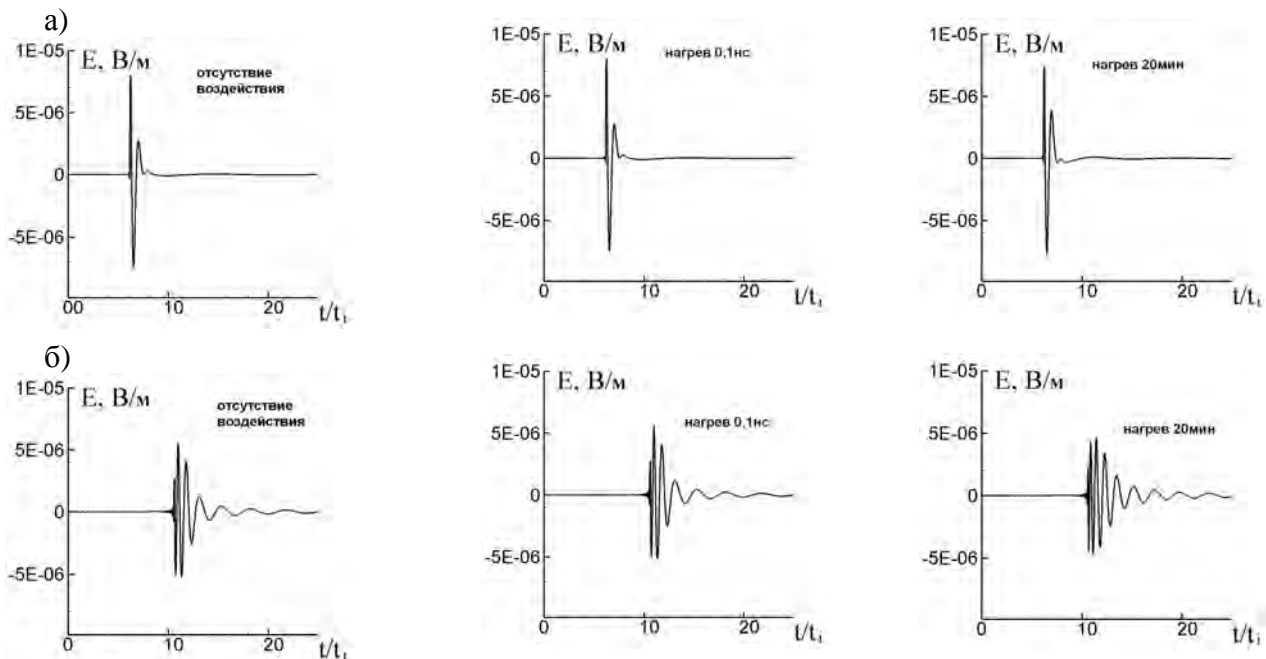


Рис.4. Форма СШП ЭМИ, достигшего высоты 100 км при отсутствии воздействия и при воздействии НС:

$a - t_i = 1 \text{ нс}$; $b - t_i = 10 \text{ нс}$

Аналогичные расчеты проводились для условий воздействия ЯВ. Формы СШП ЭМИ, достигшего высоты 100 км в различные моменты времени после ЯВ, показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что на интервале до 200 мин после подрыва происходит разрушение амплитудно-временной формы исходного импульса. Он растягивается во времени, уменьшает свою амплитуду, меняется его фазовая модуляция (отдельный анализ показывает, что амплитудно-частотная характеристика СШП ЭМИ сохраняет свою изначальную форму на участке выше критической частоты). С увеличением t_i от 1 до 10 нс спектр импульса сужается и относительно все большая его часть приходится на область частот, в пределах которых проявляются дисперсионные свойства среды распространения. В определенных случаях такие искажения формы импульса могут стать критическими, и при передаче информации может возникнуть проблема обнаружения полезного сигнала на фоне помех. Однако, опираясь на тот факт, что время запаздывания меньше для волн с большей частотой, при известных параметрах ионосферы на трассе распространения СШП ЭМИ его дисперсионные искажения являются прогнозируемыми и их можно попытаться компенсировать.

Для такой компенсации исходный импульс должен формироваться так, чтобы низкочастотные составляющие излучались раньше высокочастотных с целью их своевременного прихода в заданную точку пространства и увеличения амплитуды импульса. Получить его можно, рассчитав распространение на аналогичном участке «зеркального» во времени (рис. 6,а) СШП ЭМИ (без учета сферической расходимости фронта).

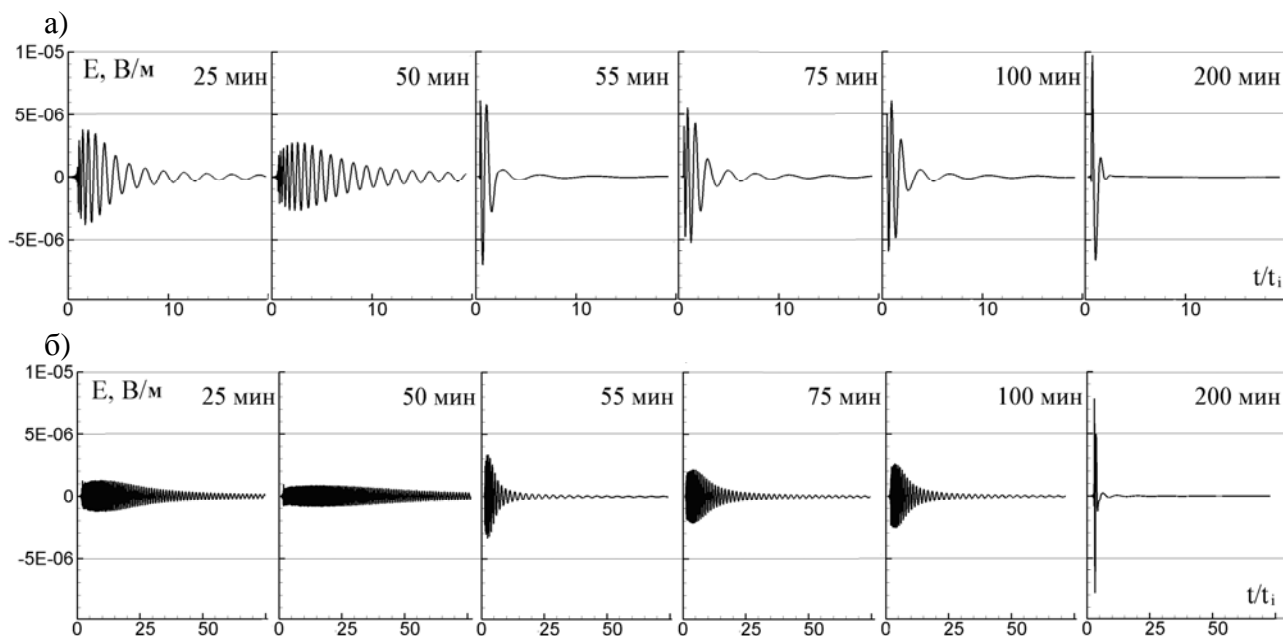


Рис.5. Форма СШП ЭМИ, достигшего высоты 100 км в различные моменты времени после ЯВ:
 а – $t_i = 1$ нс; б – $t_i = 10$ нс

Повторное зеркальное отражение полученного результата даст вид импульса (рис. 6,б), компенсирующего дисперсионные искажения СШП ЭМИ для 50-й минуты после ЯВ (рис. 5,б). Такой импульс необходимо излучить, чтобы на высоте 100 км получился скомпенсированный (рис. 6,в) СШП ЭМИ. Выигрыш по амплитуде в этом случае составляет порядка 10 раз.

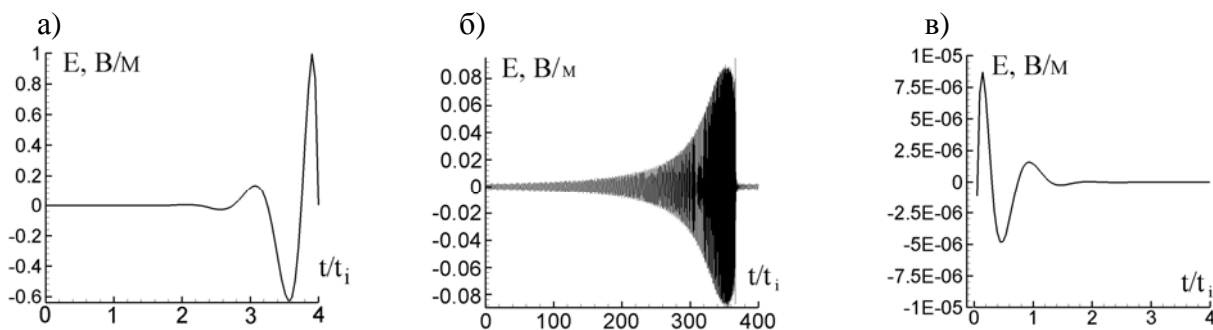


Рис.6. СШП ЭМИ: зеркальный (а), компенсирующий (б), скомпенсированный (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье исследовано влияние работы НС и ЯВ на распространение СШП ЭМИ в ионосферной плазме. В результате показано, что основным фактором, искажающим форму импульса, является возмущение концентрации электронов на трассе распространения. Возмущение концентрации частиц, вызванное НС, способно изменить форму импульса, однако сильного эффекта не возникает. Возмущения же, порожденные ЯВ на протяжении времени до 200 мин, способны вызывать разрушение амплитудно-временной формы СШП ЭМИ, его расползание во времени, уменьшение амплитуды и изменение его фазовой модуляции. В определенных случаях это может стать критичным с точки зрения обнаружения сигнала на

фоне помех. Попытка компенсации дисперсионных искажений в приведенном в работе примере дала выигрыш по амплитуде полезного сигнала порядка 10 раз.

Список используемых источников

1. *Солдатов А.В., Терёхин В.А.* Распространение сверхширокополосного электромагнитного сигнала в ионосферной плазме // *Физика плазмы.* – 2016. – Т. 42, № 10. – С. 927–935.
2. *Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф.* Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. Ч.2. Методы анализа и применение // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2008. – Т. 13, №4. – С. 270–322.
3. *Гуляев Ю.В., Стрелков Г.М.* Распространение сверхширокополосного радиоимпульса в холодной плазме // *Доклады академии наук.* – 2006. – Т. 408, № 6. – С. 754–757.
4. *Лебедев Н.В., Наумов Н.Д., Руденко В.В.* Моделирование нагрева нижней ионосферы модулированным высокочастотным излучением // *Прикладная физика.* – 2012. – № 6. – С. 92–98.
5. *Уиттен Р.К., Поппов И. Дж.* Физика нижней ионосферы. – М.: Мир, 1968. – 292 с.

А.Х. Аджиев^{*},
доктор физико-математических наук, профессор;

И.А. Готюр^{**},
доктор техн. наук, доцент;

И.И. Кононов^{***},
кандидат техн. наук, доцент;

Е.А. Коровин^{**},
кандидат техн. наук;

Ю.В. Кулешов^{**},
доктор техн. наук, профессор;

Г.Г. Щукин^{**},
доктор физико-математических наук, профессор

^{*}Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

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

^{***} Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

ЗАБЛАГОВРЕМЕННОЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ О МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДАХ ТИПА ОБЛАКО-ЗЕМЛЯ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ И ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В работе проведен анализ данных системы мониторинга грозовой активности и датчика напряженности электрического поля с целью определения характеристик алгоритма автоматического предупреждения о молниевых разрядах типа облако-земля.

Ключевые слова: грозопеленгатор, измеритель напряженности электрического поля, молниевый разряд, автоматическое предупреждение.

ВВЕДЕНИЕ

Заблаговременное предупреждение о возникновении грозы имеет важнейшее значение при обеспечении безопасности во многих областях деятельности человека. Успешное выведение на орбиту космических аппаратов различного назначения, а также обеспечение безопасности пилотируемых полетов напрямую связаны с грозовой деятельностью. Прогнозирование гроз важно для полетов авиации, проведения массовых мероприятий под открытым небом, обеспечения безопасности при погрузочных работах, транспортировании и испытаниях взрывчатых веществ.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ

В настоящее время возникновение молниевых разрядов (МР) может быть спрогнозировано на основе данных пассивных систем мониторинга грозовой активности [1], фиксирующих время, координаты и другие характеристики МР; метеорологических радиолокаторов [7] или датчиков напряженности электрического поля. Анализ эффективности применения этих систем на территории космического центра Кеннеди приведен в работе [4]. Также известны системы предупреждения на основе комплексного использования указанных систем. Результаты совместного применения датчиков молний и измерителей напряженности электрического поля описаны в работе [5].

Для реализации заблаговременного предупреждения о МР между облаком и землей (далее МР) по данным грозопеленгационной сети используется алгоритм, предложенный в работе [3]. Защищаемый объект расположен в пределах области, центром которой является точка, окруженная двумя областями. Области представляют собой квадраты со сторонами 20 и 40 км. В указанной работе квадраты заменены на окружности с центрами в точке с координатами 43.469372° с. ш, 43.585737° в. д. Контролируемая область находится в пределах окружности радиусом 10 км. Область предупреждения расположена в окружности радиусом 20 км и ограничена внутри контролируемой областью (рис. 1). Изменение формы областей в виде квадратов, используемых в работе [3] на окружности, принято для дальнейшего комплексирования данных грозопеленгационной сети с данными измерителя напряженности электрического поля. Напряженность электрического поля у земной поверхности зависит от величины и конфигурации зарядов в грозовом облаке, их высоты и удаленности от измерителя. Для известного заряда на заданной высоте показания измерителя напряженности поля будут определяться расстоянием от прибора до заряда, в связи с чем области предупреждения и контроля более рационально определять в виде окружностей. Области предупреждения и контроля в виде квадратов удобны для упрощения вычислений при реализации алгоритма заблаговременного предупреждения о МР по данным грозопеленгационной сети, но требуют учета геометрии в случае использования данных о градиенте электрического поля.



Рис. 1. Расположение областей предупреждения и контроля

Исходными данными алгоритма заблаговременного предупреждения о возникновении МР являются координаты МР. Определение координат осуществлялось системой мониторинга грозовой активности, установленной на Северном Кавказе. Система состоит из четырех датчиков LS8000 фирмы *Vaisala* и центрального пункта приема и обработки информации. Датчики расположены близ населенных пунктов Черкесск (КЧР), Кызбурун (КБР), Ставрополь и Зеленокумск (Ставропольский край).

Обнаружение МР системой датчиков LS8000 в области предупреждения является признаком приближающейся грозы. В данном случае формируется сигнал предупреждения о грозоопасности и запускается 30-минутный таймер (время выдержки). Если в течение 30-минутного интервала фиксируются повторные МР в области предупреждения или контролируемой области, таймер обнуляется и отсчет времени выдержки продлевается на 30 мин. В противном случае сигнал предупреждения о грозоопасности прекращается. Таким образом, суть алгоритма автоматического предупреждения о грозоопасности на основе данных грозо-

пеленгационной сети состоит в формировании предупреждающего сигнала при условии обнаружения МР в областях предупреждения или контроля. Прекращение сигнала происходит через 30 мин после регистрации последнего МР в данных областях.

Анализ эффективности алгоритма автоматического предупреждения на основе данных грозопеленгационной сети производился исходя из трех вариантов развития событий: 1) МР обнаружен в области предупреждения, и в течение действия предупреждающего сигнала зафиксирован, по крайней мере, один МР в контролируемой области; 2) МР обнаружен в области предупреждения и в течение времени действия предупреждающего сигнала не зафиксировано МР в контролируемой области; 3) первым обнаружен МР в контролируемой области при отсутствии сигнала предупреждения, т.е. ранее не было зафиксировано МР в области предупреждения. Если наблюдается первый вариант, рассчитывается время предупреждения (интервал времени между началом оповещения о грозоопасности и первым МР в контролируемой области). При превышении времени предупреждения 10 мин фиксируется факт корректного предупреждения. Если время предупреждения меньше 10 мин, фиксируется факт отсутствия заблаговременного предупреждения. При развитии второго варианта отмечается факт ложного предупреждения. В случае образования кучево-дождевых облаков (Cb) и их развития до грозовой стадии непосредственно над контролируемой областью может наблюдаться третий вариант, при котором первый МР обнаружен в области контроля. При этом фиксируется факт отсутствия заблаговременного предупреждения.

Определение частоты корректного предупреждения осуществляется из отношения числа случаев корректного предупреждения к числу случаев предупреждения с МР в контролируемой области:

$$P = \frac{S}{C}, \quad (1)$$

где S – число случаев корректного предупреждения,

C – число случаев предупреждения с МР в контролируемой области.

Частота пропуска опасного явления определяется из выражения

$$F = 1 - P \quad (2)$$

либо

$$F = \frac{C-S}{C}.$$

Частота ложных срабатываний связана с частотой корректного предупреждения выражением

$$R = \frac{A}{A+S}, \quad (3)$$

где A – число случаев ложного предупреждения.

Для расчета статистических вероятностей были использованы данные о координатах МР за период с 01.08.2016 г. по 01.10.2017 г. Всего за данный период было отмечено 38 случаев грозовой активности в контролируемой области (табл. 1). Число предупреждений о грозовой опасности несколько превышает число случаев предупреждения с МР в контролируемой области (C), что говорит о наличии ложных срабатываний (A).

Таблица 1

Результаты работы алгоритма автоматического предупреждения о грозоопасности с применением данных грозопеленгационной сети

Интервал наблюдений	Число предупреждений	МР в контролируемой области без предупреждения	C	S	A
Август (2016)	15	1	11	10	5
Май (2017)	6	0	2	2	4
Июнь (2017)	18	2	12	10	8
Июль (2017)	10	0	3	3	7
Август (2017)	16	2	10	8	7
Всего	65	5	38	33	32

Частота корректного предупреждения P согласно выражению (1) для всего периода наблюдений составляет значение 0,87, значит, частота пропуска опасного явления F в соответствии с формулой (2) достигает 0,13. Частота ложных срабатываний R , получаемая из выражения (3), имеет значение 0,49. Несмотря на достаточно высокую статистическую вероятность корректного предупреждения ($P = 0,87$) и небольшую частоту ложных срабатываний ($F = 0,49$), рассматриваемый алгоритм автоматического предупреждения о грозоопасности на основе данных грозопеленгационной сети имеет принципиальное ограничение, связанное с особенностью работы датчиков молний. Система датчиков LS8000, как и подавляющее большинство других пассивных систем, реализует обнаружение МР за счет приема электромагнитного излучения, образующегося в результате движения заряда по ионизированному каналу молнии или излучения лидерной стадии. Очевидно, что в случае попадания первого МР в контролируемую область заблаговременного предупреждения не происходит. Такая ситуация согласно проведенному анализу работы алгоритма прогнозирования МР на основе информации, получаемой от системы датчиков молний LS8000 в районе г. Нальчик, за период наблюдений с августа 2016 года по сентябрь 2017 года фиксируется 5 раз.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ И ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Развитие конвективной облачности, в частности S_b , связано с разделением зарядов, величина которых растет по мере формирования зрелого грозового облака. Применение датчика напряженности электрического поля позволяет фиксировать разделение атмосферных зарядов на расстояниях до 10–15 км, что является достаточным для обеспечения прогнозирования МР в контролируемой области. Заблаговременное предупреждение о приближающейся грозе реализуется на основе данных измерителя градиента электрического поля и датчиков молний, в соответствии с алгоритмом, описанном в работе [5]. По аналогии с конфигурацией областей, использующихся при реализации алгоритма автоматического предупреждения о грозоопасности с применением данных грозопеленгационной сети, точка с координатами 43.469372° с.ш, 43.585737° в.д. является центром двух окружностей радиусом 10 и 20 км, определяющих области предупреждения и контроля (рис. 1). В центре окружностей располагается измеритель напряженности электрического поля «Рябина» [2, 6]. Данный прибор позволяет оценить градиент электрического поля в полосе 0–5 Гц с разрешающей способностью не хуже 1 В/м. Результаты измерения электрического поля для снижения амплитуды быстрых изменений подвергаются усреднению на интервале 60 сек. Критерием наличия над контролируемой областью кучево-дождевых облаков в зрелой стадии является превышение порогового значения 1000 В/м [5]. Сигнал грозоопасности формируется в случае обнаружения датчиками грозопеленгационной сети МР в зоне предупреждения или при превышении фиксируемым значением градиента электрического поля порогового значения. Таймер отсчета времени выдержки также сбрасывается при повторных ударах в области предупреждения и превышении порога.

Из табл. 2 видно, что наряду с увеличением числа случаев успешного обнаружения в значительной степени выросло число ложных срабатываний. Это объясняется тем фактом, что превышение порогового значения градиента электрического поля фиксируется в результате разделения зарядов в S_b , не достигшем стадии зрелости. Кроме того, на измеряемый в приземном слое градиент электрического поля оказывает влияние не только S_b , но и другие типы облачности. Любое разделение зарядов в непосредственной близости от измерителя приводит к значительным изменениям показаний прибора.

Частота корректного предупреждения P при совместном использовании данных измерителя напряженности электрического поля и грозопеленгационной сети согласно выражению

(1) составляет значение 1, что говорит об отсутствии случаев возникновения МР в контролируемой области без предварительного предупреждения. Частота ложных срабатываний R значительно возрастает в связи с обусловленной многими факторами изменчивостью электрического поля и достигает значения 0,84.

Таблица 2

Результаты работы алгоритма автоматического предупреждения о грозоопасности на основе использования данных грозопеленгационной сети и датчика напряженности электрического поля

Интервал наблюдений	Число предупреждений	МР в контролируемой области без предупреждения	C	S	A
Август (2016)	15	0	11	11	26
Май (2017)	6	0	2	2	31
Июнь (2017)	18	0	12	12	53
Июль (2017)	10	0	3	3	44
Август (2017)	16	0	10	8	57
Всего	65	0	38	38	201

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных о координатах МР, рассчитываемых системой, которая включает четыре датчика LS8000 и напряженности электрического поля, фиксируемой прибором «Рябина», получены статистические оценки эффективности алгоритмов автоматического предупреждения о грозовой активности в районе г. Нальчик. Совместное использование информации о координатах МР и напряженности электрического поля позволяет заблаговременно и с большей, чем при использовании данных исключительно грозопеленгационной сети достоверностью прогнозировать возникновение опасного атмосферного явления. Вместе с тем отмечается повышение частоты ложных срабатываний.

Список используемых источников

1. Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 220 с.
2. Датчик напряженности электрического поля Земли / Е.А. Коровин, В.А. Ефимов, Д.А. Денисенков и др. // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Армандовские чтения». – 2016. – С. 254–259.
3. Murphy, M.J., Demetriades N.W.S., Cummins K.L. 2002a: Probabilistic early warning of cloud-to-ground lightning at an airport. 16 th Conf. on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences // Amer. Meteorol. Soc. – Orlando, FL. – P. 126–131.
4. Murphy M.J., Holle R.L. 2006: 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.
5. Murphy M.J., Holle R.L., Demetriades N.W.S. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations // 20th International Lightning Detection Conference. – Tucson, [AZ, U.S.]: Vaisala Inc, 2008.
6. Измеритель напряженности электрического поля атмосферы / А.Х. Аджиев, Е.А. Коровин, С.В. Чернышев и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – №5. – С. 125–129.
7. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – 2-е изд. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 343 с.

К.М. Беккиев*;

А.В. Шаповалов*;

доктор физико-математических наук, профессор

*Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

РАСЧЕТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИК ДИАПАЗОНА В ОБЛАЧНОЙ СРЕДЕ

Проведены расчеты микроструктурных характеристик конвективных облаков с применением трехмерной нестационарной численной модели. Исследованы характеристики облака на разных стадиях развития. С использованием полученных в численных экспериментах функций распределения капель и кристаллов по размерам рассчитаны ослабление, поглощение и рассеяние электромагнитного излучения в облачной среде.

Ключевые слова: конвективные облака, спектры частиц, поглощение и рассеяние, численная модель, инфракрасное излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Работа оптико-электронных систем зависит как от их технических характеристик, так и от состояния атмосферы, содержащей аэрозольные частицы и облачность. Исследование условий и характеристик распространения электромагнитных волн в облачной (аэрозольной) атмосфере является важной и актуальной научно-технической задачей.

Как известно, физические свойства дисперсных сред (облаков) зависят от размеров частиц, их концентрации, фазового состояния. Исследованию этих вопросов посвящено множество работ в нашей стране и за рубежом. Вопросы влияния дисперсных сред на электромагнитные излучения (ЭМИ) подробно рассмотрены в работах [2, 5–7]. Для изучения различных прикладных вопросов, связанных с прохождением ЭМИ в таких средах, необходима информация о микроструктуре зондируемой облачности. Для получения такой информации используются данные измерений [4], а также результаты моделирования по микрофизическим моделям облаков, представленных, например, в работах [1, 3].

Целью данной работы являлись расчеты микроструктурных характеристик конвективных облаков и анализ влияния облачной среды на распространение сигнала от источника монохроматического ЭМИ инфракрасного (ИК) диапазона длин волн.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ОБЛАКА

Гидротермодинамический блок используемой модели облака описан в работах [3, 4]. В модели учитываются следующие микрофизические процессы: коагуляция капель с каплями, аккреция, замерзание капель, седиментация капель и кристаллов, а также их перенос воздушными потоками. Уравнения для функций распределения по массам капель $f_1(x, y, z, m, t)$ и ледяных частиц $f_2(x, y, z, m, t)$ с учетом вышеуказанных процессов можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} &= \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_k + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_a + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_o + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_s + \Delta' f_1 + I_1, \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + v \frac{\partial f_2}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} &= \left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_a + \left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_s + \Delta' f_2 + I_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq m < \infty, t > 0,$$

где L_x, L_y, L_z – верхние значения границ пространственной области;
 $V_1(m), V_2(m)$ – установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц;
 $K(x, y, z)$ – коэффициент турбулентной диффузии.

Выражения для расчета слагаемых, входящих в уравнения (1), приведены подробно в работе [1]. Например, для описания коагуляционных процессов в облаке применялось интегро-дифференциальное уравнение:

$$\left[\frac{\partial f}{\partial t} \right]_k = -f_1(x, y, z, m, t) \int_0^{\infty} \beta_1(m, m') \cdot f_1(x, y, z, m', t) dm' + \int_0^{m/2} f_1(x, y, z, m - m', t) \beta_1(m, m - m') f_1(x, y, z, m', t) dm', \quad (2)$$

$$\beta_1(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_1(m')| \cdot E(m, m'), \quad (3)$$

где $r(m)$ и $r(m')$ – радиусы сталкивающихся частиц;
 $V_1(m)$ и $V_1(m')$ – их скорости падения;
 $E(m, m')$ – коэффициент захвата.

Расчет взаимодействия капель и кристаллов проводился на основе следующих соотношений:

$$\left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_a = -f_1(x, y, z, m, t) \int_0^{\infty} \beta_2(m, m') \cdot f_2(x, y, z, m', t) dm' \quad (4)$$

$$\left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_a = -f_2(x, y, z, m, t) \int_0^{\infty} \beta_2(m, m') \cdot f_1(x, y, z, m', t) dm' + \int_0^m \beta_2(m, m - m') f_2(x, y, z, m - m', t) f_1(x, y, z, m', t) dm', \quad (5)$$

$$\beta_2(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_2(m')| \cdot E(m, m'), \quad (6)$$

Выражения (4)–(6) соответствуют случаю, когда столкновение кристаллов с каплями приводит к замерзанию последних.

Система уравнений (1)–(6) рассматривается при следующих начальных и граничных условиях:

$$f_1(x, y, z, m, 0) = f_1^0(x, y, z, m), \quad (7)$$

$$f_2(x, y, z, m, 0) = f_2^0(x, y, z, m),$$

$$f_1(x, y, z, m, t) = f_2(x, y, z, m, t) = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad x = L_x, \quad y = 0, \quad y = L_y, \quad z = L_z, \quad (8)$$

$$\partial f_2(x, y, z, m, t) / \partial z = \partial f_2(x, y, z, m) / \partial z \quad \text{при } z = 0.$$

Выбор граничных условий (8) обусловлен тем, что границы области расчета по пространственным переменным совпадают с видимой границей облака.

При решении уравнений модели применялись методы расщепления и прогонки.

Представленная численная модель позволяет рассчитывать эволюцию со временем термодинамических параметров и спектров капель и кристаллов в облаке.

Разработка программных модулей, реализующих численную модель термодинамических и микрофизических процессов в смешанных облаках, велась в интегрированной среде Delphi. Основной программный модуль обеспечивает инициализацию модели и расчет характеристик облака в цикле по времени.

Для расчета аэрозольного ослабления разработано программное обеспечение, в котором входными параметрами являются: длина волны излучения, размер частиц облачной (аэрозольной) среды, концентрация частиц, комплексный показатель преломления.

Процессы распространения и ослабления оптического излучения в атмосфере описывают с помощью оптических характеристик: коэффициентов ослабления, поглощения и рассеяния, оптической толщи среды, индикатрисы излучения, геометрических параметров, связанных с обратным рассеянием, поляризационных характеристик и т.д. [5].

При распространении электромагнитного излучения в слое частиц аэрозоля с функцией распределения $f(r)$ и протяженностью ΔH его мощность на выходе слоя изменится в соответствии с экспоненциальным законом Бугера:

$$P = P_0 \exp(-\alpha_e \Delta H), \quad (9)$$

где P_0 – мощность излучателя;

α_e – объемный коэффициент ослабления излучения, м^{-1} .

Причем коэффициент ослабления представляет собой сумму коэффициентов рассеяния и поглощения:

$$\alpha_e = \alpha_s + \alpha_p. \quad (10)$$

По теории аэрозольного рассеяния электромагнитного излучения Ми коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения принято выражать через соответствующие факторы эффективности аэрозольного ослабления, рассеяния и поглощения следующим образом:

$$\sigma_e = \pi r^2 K_e(r, \lambda, m), \quad (11)$$

$$\sigma_s = \pi r^2 K_s(r, \lambda, m), \quad (12)$$

$$\sigma_p = \pi r^2 K_p(r, \lambda, m), \quad (13)$$

где r – радиус частицы;

λ – длина волны;

m – комплексный показатель преломления частицы (n – показатель преломления, χ – показатель поглощения), $m = n + i\chi$.

Коэффициенты ослабления $K_e(\lambda, m, r)$, рассеяния $K_s(\lambda, m, r)$ и поглощения $K_p(\lambda, m, r)$ рассчитываются в соответствии с классической теорией рассеяния Ми [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Были проведены расчеты факторов ослабления, рассеяния и поглощения ледяных сфер радиусом от 0,001 до 10 мкм в диапазоне длин волн от 0,1 мкм до 10 см.

Данные расчетов для кристалликов $r = 0,5$ мкм приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Коэффициенты эффективности ослабления, рассеяния, поглощения и обратного рассеяния

R (м)	λ (м)	K_{oc}	K_p	K_n	$K_{обр}$
5.0000E-07	1.06E-06	1.42248e+00	1.42246e+00	2.26104e-05	8.24814e-02
5.0000E-07	2.67E-06	5.47752e-02	4.32922e-02	1.14830e-02	3.13893e-02
5.0000E-07	2.73E-06	5.46894e-02	2.89728e-02	2.57165e-02	2.18223e-02
5.0000E-07	2.78E-06	7.68004e-02	1.46873e-02	6.21131e-02	1.14659e-02
5.0000E-07	2.82E-06	1.19814e-01	6.80835e-03	1.13006e-01	5.43828e-03
5.0000E-07	2.83E-06	1.56444e-01	5.44698e-03	1.50997e-01	4.38336e-03
5.0000E-07	2.85E-06	1.98095e-01	5.61673e-03	1.92478e-01	4.55150e-03
5.0000E-07	2.86E-06	2.61698e-01	8.59917e-03	2.53099e-01	7.00291e-03
5.0000E-07	2.88E-06	3.51153e-01	1.57392e-02	3.35414e-01	1.28566e-02

С учетом спектров жидких и твердых частиц в облаке, полученных по модели облака, были рассчитаны случаи ослабления ИК излучения в слое аэрозольного метеорологического образования.

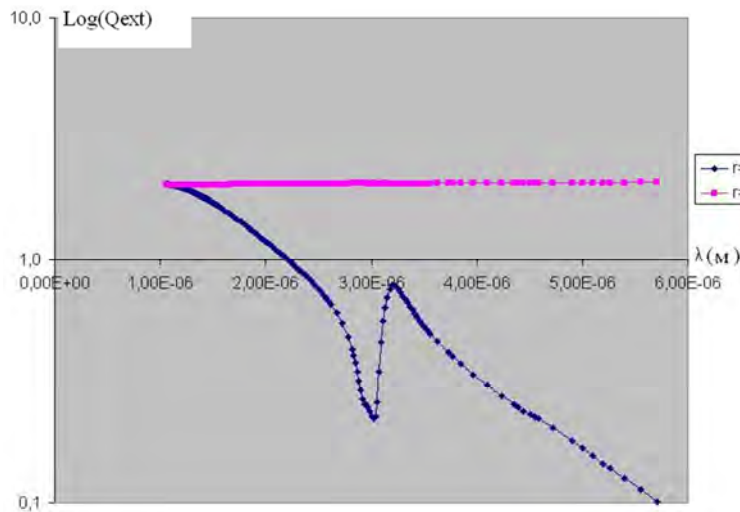


Рис.1. Коэффициент ослабления излучения для облачных кристаллов двух размеров: $r = 0,5 \text{ мкм}$ (нижняя кривая) и $r = 50 \text{ мкм}$, в зависимости от длины волны

Для оценки оптической прозрачности атмосферы используется метеорологическая дальность видимости, которая рассчитывается по формуле

$$L = \frac{b}{\sum_i n_i \cdot r_i^2}, \quad (14)$$

где b – безразмерный коэффициент, равный 0,62;
 n_i – концентрация частиц аэрозоля (тумана);
 r_i – радиусы.

Результаты расчетов оптической прозрачности атмосферы приведены в табл. 2, в которой даны радиус частиц (в мкм), десятичный логарифм концентрации, дальность видимости (в км).

Таблица 2

Метеорологическая дальность видимости в зависимости от радиуса частиц и их концентрации

R , мкм	$\text{Log } n$, м^{-3}	L , км
1	7	60
1	8	6
1	9	0,6
5	5	240
5	6	24
5	7	2,4
5	8	0,24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены расчеты микроструктурных характеристик конвективных облаков с применением трехмерной нестационарной численной модели. Исследованы характеристики облака на разных стадиях развития.

Использование в модели функций распределения капель и кристаллов по размерам позволяет рассчитывать ослабление, поглощение и рассеяние электромагнитного излучения в облачной среде с учетом фактических спектров.

Характер ослабления ИК излучения мелкими и крупными ледяными частицами в зависимости от длины волны существенно отличается. Для крупных ледяных кристаллов поглощение мало зависит от длины волны.

Список используемых источников

1. *Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В.* Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2008. – 254 с.

2. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 994 с.

3. Численное моделирование облаков / Е.Л. Коган, И.П. Мазин, Б.Н. Сергеев, В.И. Хворостьянов. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 186 с.

4. *Мазин И.П., Шметер С.М.* Облака. Строение и физика образования. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 280 с.

5. *Розенберг В.И.* Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 348 с.

6. *Liou K.N.* Radiation and cloud processes in atmosphere // Theory, observation and modeling. – Oxford, 1992.

7. *Macke A., Mueller J. and Raschke E.* Single scattering properties of atmospheric ice crystals. // J. Atmos. Sci. – 1996. – Vol. 53. – P. 2813–2825.

И.Д. Брюханов*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

ПРОБЛЕМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ СЛЕДОВ САМОЛЕТОВ: ОЦЕНКА МЕТЕОПАРАМЕТРОВ

Для выяснения механизмов образования ориентированных ансамблей кристаллических частиц в конденсационных следах самолетов необходима информация о метеорологическом состоянии атмосферы. В работе проведен сравнительный анализ метеопараметров, измеряемых шарами-зондами и на самолетах гражданского авиасообщения, а также рассчитанных по моделям ECMWF и GFS. Сделаны выводы о применимости данных от каждого источника для интерпретации результатов экспериментов на лидаре НИ ТГУ.

Ключевые слова: след самолета, лазерное зондирование, поляризационный лидар, матрица обратного рассеяния света.

ВВЕДЕНИЕ

В современных реалиях все более актуальным является изучение антропогенного воздействия на окружающую среду. В частности, общепризнанным [1, 2] является факт влияния отработанных газов, выбрасываемых в атмосферу двигателями разнообразной техники, на экологическое состояние атмосферы. Помимо прочего конденсационные следы самолетов не только сами меняют пропускание оптического излучения атмосферой, но и являются инициаторами развития облаков верхнего яруса (ОВЯ).

Температура и давление отработанных газов на выходе из авиационного двигателя существенно превышают эти же параметры у атмосферного воздуха. Поэтому происходят их быстрое расширение и формирование газозвушной смеси с влажностью, более высокой, чем у окружающей среды. Вследствие наличия ядер конденсации эта влага переходит из газовой фазы в твердую, образуя ледяные кристаллы. Интенсивно рассеивая свет, они позволяют увидеть самолетные следы. Наряду с естественными ОВЯ такие следы и инициированные ими облака существенным образом влияют на радиационный баланс атмосферы Земли [3, 4].

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА

В основном ОВЯ состоят из кристаллических ледяных частиц [5]. Пропускание такими облаками оптического излучения, а значит, и влияние на радиационный баланс атмосферы определяются параметрами их микроструктуры [6]. Существующие инструменты позволяют измерить размеры и форму таких частиц, но не их ориентацию, поскольку она нарушается при заборе проб. Оценить микроструктуру облака позволяет анализ состояния поляризации лазерного излучения при его взаимодействии с исследуемой средой. Эта идея положена в основу метода поляризационного зондирования, реализованного в высотном поляризационном лидаре Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) [7]. Эксперименты на нем проводятся с 2009 года.

Уникальной особенностью указанного лидара является возможность экспериментального определения полной матрицы обратного рассеяния света (МОРС) аэрозольных слоев. Описывая рассеяние оптического излучения света облаком, эта характеристика несет в себе исчерпывающую информацию о его микроструктуре. Однако решение проблемы

интерпретации лидарных данных влечет за собой решение множества задач, немалая часть из которых требует проработки.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННОМУ ЛАЗЕРНОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ КОНДЕНСАЦИОННЫХ СЛЕДОВ САМОЛЕТОВ

Лидар НИ ТГУ находится в южной части города, на расстоянии 0,5 км от берега р. Томь. В радиусе 100 км от Томска проходит множество самолетных трасс регулярного сообщения (рис. 1). Отсутствие низкой облачности и соответствующее направление ветра позволяют зондировать конденсационные следы самолетов на высотах до 15 км. Ранее сотрудниками кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования НИ ТГУ проводились эксперименты по поляризационному лазерному зондированию как одиночного самолетного следа [8], так и ряда таких следов [9].

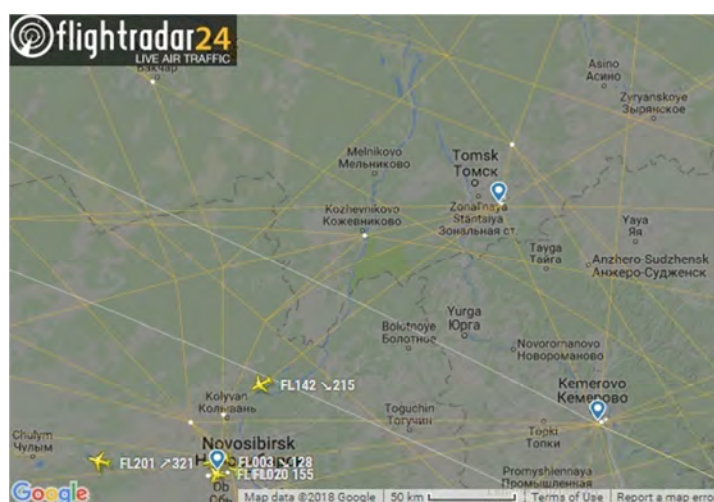


Рис.1. Самолетные трассы вблизи Томска [10]; синими метками обозначены аэропорты

Для уменьшения погрешностей и анализа временной динамики параметров атмосферы во время эксперимента на поляризационном лидаре НИ ТГУ требуется накопление сигналов обратного рассеяния. Актуальная методика проведения эксперимента и обработки его результатов позволяет анализировать обратное рассеяние зондирующего излучения для каждого импульса лазера (частота повторения импульсов составляет 10 Гц). Таким образом, возможно непосредственное выделение в экспериментальных данных интервалов времени, в течение которых наблюдались аэрозольные слои.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА НА ВЫСОТАХ ЗОНДИРУЕМЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ СЛОЕВ

Интерпретация лидарных исследований требует наличия достоверных данных о метеорологической обстановке. Ближайшие к месту расположения лидара метеостанции, поставляющие высотные профили метеовеличин, находятся в г. Колпашево (станция 29231; ~240 км северо-западнее Томска) и Новосибирске (станция 29634; ~250 юго-западнее Томска). Измерения на них выполняются 2 раза в день в 00:00 и 12:00 UTC (всемирное координированное время; с 29 мая 2016 г. Томское время – UTC+7). Для удобства далее будем оперировать Томским временем. Результаты находятся в свободном доступе (например, в [11]). Шары-

зонды достигают высот до 28 км [12], а данные, поставляемые обеими метеостанциями, часто близки между собой.

Несмотря на наличие описанных данных, актуальной является задача нахождения более близкого к Томску источника высотных профилей метеопараметров. В поисках такого источника рассмотрены данные о температуре окружающего воздуха, а также скорости и направлении ветра, получаемые с самолетов [10]. Для анализа в течение нескольких дней февраля–марта 2018 года выбирались самолеты, находящиеся наиболее близко к метеостанциям, и фиксировались метеоданные с них. Это происходило во время, близкое ко времени измерений на указанных метеостанциях. Сопоставление с результатами измерений шарми-зондами показало (табл. 1 и 2) частое расхождение данных. В качестве критерия близости метеопараметров, полученных из разных источников, взяты следующие максимальные разности: температура 10°C, направление и скорость ветра 45° и 10 м/с соответственно. Примечательны данные измерений, полученные с самолетов в 19:03 и 19:20 (табл. 2). В первом случае температура воздуха на высоте 350 м от поверхности земли составила –51°C, что расходится с данными от шара-зонда более чем на 50°C. Во втором случае отличия метеопараметров, полученных с одного и того же самолета, от данных ближайшей метеостанции не только превышают обозначенные пределы расхождения, но и повторяют друг друга для высот в 5,6 и 2,8 км. Вследствие выявления ряда таких наборов метеовеличин можно сделать вывод о несоответствии метеопараметров на сайте фактическому местоположению самолета. Это заключение не позволяет опираться на метеоданные, получаемые с самолетов, для интерпретации результатов поляризованного лазерного зондирования.

Таблица 1

Метеопараметры от 19:00 23.03.2018 г., измеренные шарами-зондами [11]

Метеостанция	Высота, м	Ветер		Температура воздуха, °C
		Направление, °	Скорость, м/с	
Колпашево	250	235	8,23	1,3
	656	255	13,90	–2,1
	5569	240	36,53	–28,5
	6830	230	43,73	–39,3
	8803	225	60,20	–54,6
	9791	230	51,96	–59,7
	9890	230	51,96	–59,7
	11290	240	38,07	–58,7
Новосибирск	5629	242	26,24	–27,7
	6960	230	31,90	–35,1
	8933	225	44,24	–53,9
	9825	225	47,84	–58,5
	10461	220	52,99	–62,5
	10730	221	49,39	–62,7
	11493	225	40,13	–61,4

Вторым источником вертикальных профилей метеопараметров рассмотрены модели ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) и GFS (Всемирная система прогнозирования Национальной метеорологической службы США). Данные находятся в свободном доступе [13]. Сайт предоставляет данные на 10 дней, однако точность обеих моделей падает по мере удаления даты и времени прогноза от текущего времени. Поэтому для рассмотрения выбирались только данные на текущий момент и фиксировались непосредственно во время начала измерений шарами-зондами на указанных метеостанциях (табл. 3).

Таблица 2

Метеопараметры, измеренные на самолетах 23.03.2018 г. [10]

Местное время	Рейс	Ближайшая метеостанция	Высота GPS, м	Ветер		Температура воздуха, °С
				Направление, °	Скорость, м/с	
19:06	SU1846	Колпашево (150)	10097	342	73,05	-48
19:13	SU1846	Колпашево (<50)	10127	342	73,05	-48
19:32	JD431	Колпашево (100)	11072	304	24,69	-69
19:03	S7179	Новосибирск (<50)	305	350	55,56	-51
19:15	S7582	Новосибирск (100)	5265	296	30,87	-61
19:20	S7582	Новосибирск (100)	2606	296	30,87	-61

Примечание. В столбце «Ближайшая метеостанция» в скобках указано удаление самолета от места запуска шара-зонда в километрах с точностью до 50 км.

Таблица 3

Метеопараметры, рассчитанные по модели ECMWF для 19:00 23.03.2018 г. [13]

Ближайшая метеостанция	Высота, м	Ветер	
		Направление, °	Скорость, м/с
Колпашево	5500	ЮЗ	26–28
	7000	ЮЗ	28–30
	9000	ЮЗ	26–28
	10000	ЮЗ	28–30
	11700	ЮЗ	28–30
Новосибирск	5500	ЗЮЗ	26–28
	7000	ЮЗ	28–30
	9000	ЮЗ	28–30
	10000	ЮЗ	28–30
	11700	ЮЗ	28–30
Томск	5500	ЗЮЗ	24–26
	7000	ЮЗ	28–30
	9000	ЮЗ	28–30
	10000	ЮЗ	28–30
	11700	ЮЗ	28–30

Примечание. Ввиду ограниченности объема статьи, приведены данные только для модели ECMWF.

Сопоставление расчетных данных с результатами измерений на метеостанциях выявляет в большинстве случаев их существенную близость. Этот результат ожидаем, поскольку входными параметрами для расчетов являются, в том числе, результаты измерений шарами-зондами по всему миру. Тем не менее выполненная проверка позволяет использовать модельные данные, рассчитанные для Томска, с целью интерпретации данных результатов экспериментов. Следует отметить малозначимые различия расчетных данных для трех рассмат-

риваемых городов, полученных на основе обеих погодных моделей (по крайней мере, при условии анализа краткосрочного прогноза).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренном примере метеорологическая обстановка над городами Колпашево и Новосибирском близка – такая ситуация хоть и обычна, но не обязательна. Сравнительный анализ метеопараметров, полученных из трех указанных источников в течение ряда дней, позволяет сделать вывод о непригодности данных, получаемых с самолетов [10], с целью интерпретации лидарных данных. При этом метеопараметры, рассчитанные по моделям ECMWF и GFS в краткосрочной перспективе [13], показали высокую степень близости с результатами измерений шарами-зондами. Эта близость позволяет использовать данные, рассчитанные для Томска, с целью анализа результатов экспериментов на высотном поляризационном лидаре НИ ТГУ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант 16-05-00710) и Программы «Научный фонд имени Д.И. Менделеева Томского государственного университета» за 2018 год.

Список используемых источников

1. Дмитриева Т.М. К оценке воздействия гражданской авиации на окружающую среду // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. тр. – М.: ИД ЭНЕРГИЯ, 2009. – Вып. 11. – С. 179–182.
2. Biological and health effects of exposure to kerosene-based jet fuels and performance additives / G. Ritchie et al. // J. Toxic. Env. Health, Part B. – 2003. – Vol. 6, № 4. – P. 357–451.
3. Investigation of East Asian Clouds with Polarization Light Detection and Ranging / S.N. Volkov et al. // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54, № 11. – P. 3095–3105.
4. Cloud Effects on the Radiation Budget Based on ISCCP Data (1991 to 1995) / E. Raschke et al. // Int. J. Climat. – 2005. – Vol. 25. – P. 1103–1125.
5. Радиационные свойства перистых облаков / под ред. Е.М. Фейгельсон. – М.: Наука, 1989. – 223 с.
6. Dependence of polarization characteristics of the double scattering lidar return from liquid water content of clouds / E.V. Nee et al. // Proc. SPIE. – 2016. – Vol. 10035. – 100354A (6 pp.).
7. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости / И.В. Самохвалов, Б.В. Кауль, С.В. Насонов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 5. – С. 403–411.
8. Определение матрицы обратного рассеяния света конденсационного следа самолета / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, И.В. Животенюк и др. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXII Международного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. – С. 465–468.
9. Оптические характеристики конденсационных следов самолетов / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, И.В. Животенюк и др. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXIV Международного симпозиума, 2018 [направлено в печать].
10. Flightradar24. – URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 02.05.2018).
11. University of Wyoming. – URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 02.05.2018).
12. Томский ЦГМС. – URL: <http://www.meteo-tsk.ru/about/m08> (дата обращения: 02.05.2018).
13. Windy. – URL: <https://windy.com> (дата обращения: 02.05.2018).

И.Д. Брюханов*;
С.В. Зуев**,
кандидат техн. наук;
И.В. Самохвалов*

* Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

** Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ И ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ У ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматриваются результаты комплексного эксперимента (продолжительностью более года) по исследованию оптических и микрофизических характеристик перистых облаков при одновременном измерении потоков солнечной радиации у поверхности Земли. Обработка данных показывает, что перистые облака достаточно часто содержат слои горизонтально ориентированных кристаллических частиц льда. Это оказывает существенное влияние на пропускание солнечной радиации.

Ключевые слова: перистые облака, поляризационный лидар, мониторинг, ориентации кристаллов, солнечная радиация.

ВВЕДЕНИЕ

Облака оказывают большое влияние на многие стороны деятельности человека, изменяя тепловой и радиационный режимы атмосферы. Оптические и микрофизические характеристики капельных облаков достаточно хорошо изучены. В отличие от облаков нижнего и среднего ярусов облака верхнего яруса (ОВЯ), как правило, состоят из кристаллических частиц льда – это перистые облака. По внешнему виду перистые облака представляют собой отдельные белые волокнистые облака, обычно очень тонкие и прозрачные. Высота основания в умеренных широтах обычно составляет 7–10 км, в тропиках достигает 17–18 км. Геометрическая толщина облачного слоя варьируется, иногда достигая нескольких километров. Несмотря на малые оптические толщину горизонтальная протяженность перистых облаков велика (до тысячи километров), поэтому они существенно влияют на количество солнечной радиации, приходящей на земную поверхность, и более того – усиливают парниковый эффект, возвращая назад уходящее в Космос тепловое излучение Земли [1].

На сегодняшний день известно множество работ, посвященных изучению ОВЯ. Вместе с тем многие проблемы взаимодействия излучения с частицами несферической формы остаются открытыми. Главная нерешенная проблема – оптическая анизотропия перистых облаков, вызванная пространственной ориентацией кристаллических микрочастиц льда. Для примера на рис. 1 представлена теоретически рассчитанная зависимость первого диагонального элемента матрицы экстинкции (коэффициента ослабления) ансамбля горизонтально ориентированных ледяных цилиндров диаметром 20 мкм от θ – угла падения излучения на слой частиц и угла φ – угла преимущественной ориентации осей частиц в горизонтальном слое относительно плоскости падения, которая определяется местной вертикалью и направлением волнового вектора зондирующего излучения [2]. Как видно из рисунка, даже для простейшей модели анизотропной рассеивающей среды диагональный элемент матрицы экстинкции ведет себя сложным образом. Сложившаяся ситуация легко объясняется тем, что до сих пор не существует инструментальных методов определения ориентации несферических частиц в атмосфере, тем более на высотах образования перистых облаков.

В настоящей статье рассматривается вопрос: как преимущественно горизонтальная ориентация кристаллических частиц льда в перистых облаках влияет на пропускание прямой солнечной радиации.

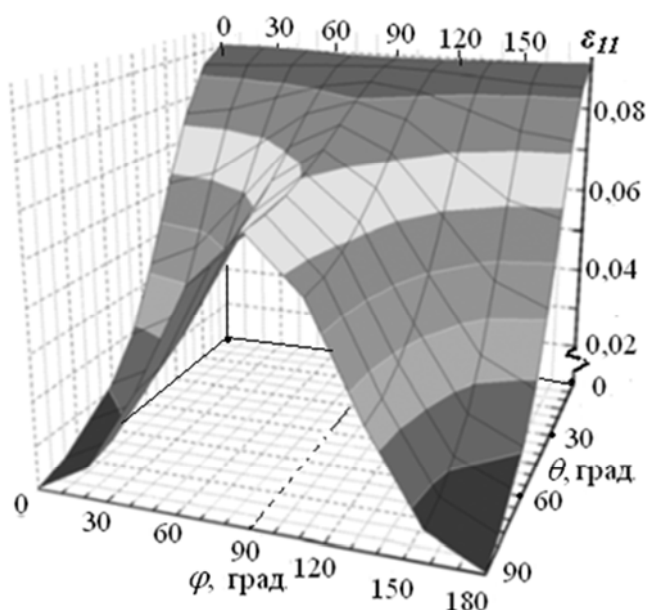


Рис.1. Коэффициент ослабления слоя ε_{11} ориентированных столбиков ($d = 20$ мкм) в зависимости от θ – угла падения излучения на слой и φ – угла преимущественной ориентации осей частиц в горизонтальной плоскости относительно плоскости падения

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В Томском государственном университете разработан метод лазерного поляризационного зондирования и создан поляризационный лидар, который позволяет дистанционно с поверхности Земли обнаруживать перистые облака и определять состояние ориентированности кристалликов льда [3, 4]. Суть данного метода заключается в последовательной посылке лазером излучения с четырьмя различными состояниями поляризации и с регистрацией приемной системой лидара излучения, рассеянного облаком в направлении назад, при четырех различных комбинациях поляризационных элементов приемника. В отличие от ранее проводимых экспериментов в настоящее время регистрация лидарных сигналов от облаков верхнего яруса ведется в режиме «параллельного» накопления одноэлектронных импульсов. Это позволяет определять все 16 элементов матрицы обратного рассеяния света (МОРС) с одинаковой погрешностью не хуже 2-3%. Кроме того, методика обработки лидарных данных позволяет учесть вклад многократного рассеяния (МР) [5] и по поляризационным характеристикам МР получить дополнительную информацию о микроструктуре облачных образований.

В течение 2017 года выполнено 367 сеансов зондирования, из них в 138 сеансах наблюдались одиночные облачные слои, в 40 – два и более слоев, а в 189 сеансах наблюдалась безоблачная атмосфера. Как правило, зондирование выполнялось с длиной строка от 37,5 до 150 м; рабочий «потолок» приема лидарных сигналов был увеличен до 18 км.

Актинометрические измерения потоков солнечной радиации проводились в автоматическом режиме ежедневно [6] на площадке ИМКЭС СО РАН, удаленной от места расположения лидара на 5 км. В качестве примера на рис. 2 представлен суточный ход потока суммарной солнечной радиации при наличии перистых облаков.

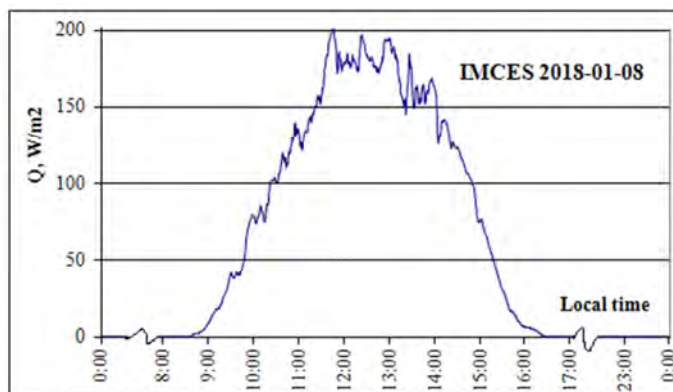


Рис.2. Поток суммарной солнечной радиации 08.01.2018

Высотные профили метеовеличин над городом Томск, необходимые для интерпретации результатов лидарных экспериментов, оценивались по данным метеостанций городов Новосибирск и Колпашево, размещаемым на сайте Вайомингского университета США в открытом доступе [7]. Для автоматического получения этой информации использовался специально разработанный программно-алгоритмический комплекс [8]. Метеоданные включают температуру, давление, влажность воздуха, скорость и направление ветра на уровне образования ОВЯ.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЗОНДИРОВАНИЮ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Повышенный интерес представляют кристаллические облака с аномально высоким обратным рассеянием. Этот эффект связан с «зеркальным» отражением излучения от ледяных кристаллов облаков, преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости. При вертикальном зондировании в направлении «зенит» параметром, характеризующим полярную ориентацию, является элемент m_{44} нормированной МОРС независимо от наличия или отсутствия азимутальной ориентации [9]. Как показано в [3], дополнительным признаком «зеркальности» облака является отношение рассеяния на высоте h , определяемое как $R(h) = (\beta_{\pi}^m + \beta_{\pi}^a) / \beta_{\pi}^m$, где β_{π}^m и β_{π}^a – коэффициенты обратного молекулярного и аэрозольного рассеяния соответственно. При значениях параметров облака $m_{44} < (-0,4)$ и $R(h) \gg 1$ его можно считать «зеркальным» [3]. Из накопленных в 2017 году данных этому критерию удовлетворяют около 30 экспериментов, результаты которых представлены на рис. 3.

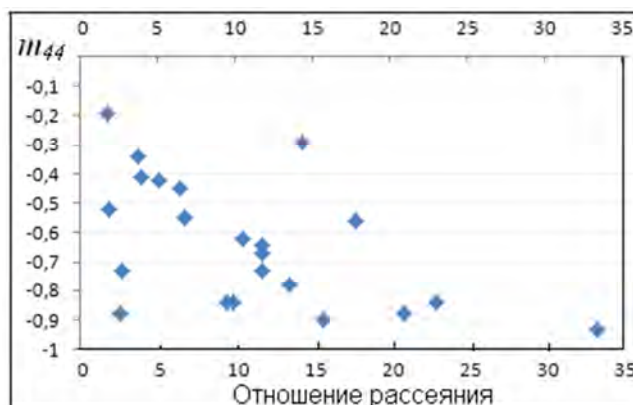


Рис.3. Отношение рассеяния и элемент m_{44} МОРС «зеркальных» облаков

В табл. 1 приведены результаты инструментальных наблюдений за перистыми облаками в Томске при примерно одинаковом положении Солнца над горизонтом.

Таблица 1

Характеристики ОВЯ, метеопараметры и поток суммарной солнечной радиации Q

№ п/п	Дата и время (местн.), зенитный угол Солнца	Границы облака, тах лидарного сигнала, км	$T, ^\circ\text{C}$	$D, ^\circ\text{C}$	$R, \%$	m_{44} (H_M) ($H_{\text{ср}}$)	$R(h_1)$	τ	Форма облаков	Балл облачности	Плотность потока Q , $Q_{\text{пр}}$, Вт/м ²
1	10.01.17 12:23- 12:39 78,3 град	4,6–6,5 $H_M=5,1$	–56	–67	24	–0,78 –0,59	13,6	0,56	Ci fib.	10	163 105
2	20.01.17 12:46- 13:02 76,6 град	4,1–10,3 $H_M=5,2$	–33	–42	40 ↑ 70	–0,34 –0,44	3,7	1,31	Ci fib.	10	192 262
3	28.01.17 13:02- 13:19 75,0 град	4,6–8,2 $H_M=5,2$	–32	–36	70 ↓ 49	–0,93 –0,93	33,4	1,03	Ci fib. Cs	10	241 248
4	01.02.17 14:34- 14:51 78,2 град	5,3–6,4 $H_M=5,8$	–32	–36	69 ↓ 27	–0,73 –0,94	2,7	0,38	Ci fib. Ac	10	180 97
5	10.03.17, 14:09– 14:42 64,9 град	6,2–8,4 $H_M=7,5$	–50	–55	31 ↑ 60	–0,88 –0,69	2,65	0,35	Ci fib.	10	443 231
6	10.03.17, 16:20– 16:54 77,6	6,8–9,7 $H_M=7,35$	–50	–55	31 ↑ 60	–0,55 –0,18	6,76	0,46	Ci fib.	10	173 101
7	11.04.17, 16:59– 17:15 73,0 град	6,7–10,4 $H_M=7,5$	–48	–52	63	–0,41 –0,14	3,92	1,01	Ci fib. Cc floc.	10	208 210
8	28.10.17, 12:51– 13:07 70,7 град	4,125– 5,475 $H_M=5,1$	Нет данных			–0,84 –0,77	9,44	0,60	Ci fib. Ac trans.	10	277 186

Во второй колонке приведены время эксперимента и зенитный угол положения Солнца, в третьей колонке – высоты нижней и верхней границ облака и высота H_M , на которой формируется максимум лидарного сигнала. Элемент МОРС m_{44} рассчитывался для высоты H_M (верхнее значение) и усреднялся для всех высот облака $H_{\text{ср}}$ (нижнее значение). В крайней правой колонке представлены измеренные значения плотности потока солнечной радиации и приведенный поток: это некий эффективный поток, если оптическая толщина облака была равна 1. Здесь же приведены данные о температуре T [$^\circ\text{C}$], точке росы D [$^\circ\text{C}$] и относительной влажности воздуха R [%] (станция г. Колпашево), взятые с сайта [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты комплексных экспериментов показывают, что величины потоков солнечной радиации у поверхности Земли варьируют в широких пределах, и они зависят от многих факторов. Тем не менее поток суммарной солнечной радиации, измеряемой у поверхности Земли заметно отличается для ОВЯ, состоящих из хаотически ориентированных частиц льда и облаков с существенной ориентацией кристаллов в горизонтальной плоскости. Установлено, что облака с аномальным обратным рассеянием («зеркальные») наблюдаются достаточно часто, и наблюдения за ними могут составлять до 30% всех наблюдений ОВЯ. Поэтому данный эффект необходимо особо учитывать при расчете радиационного баланса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 16-05-00710) и Программы «Научный фонд имени Д.И. Менделеева Томского государственного университета», 2018 год.

Список используемых источников

1. Зувев В.Е., Тутов Г.А. Оптика атмосферы и климат. – Л.: Гидрометеиздат, 1996. – 255 с.
2. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Теория и результаты лазерного зондирования ориентированных кристаллических частиц в облаках // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 12. – С.1051–1057.
3. Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering / I.V. Samokhvalov, I.D. Bryukhanov, S.V. Nasonov et al. // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 55, № 8. – P. 925–929.
4. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16, № 4. – С. 354–361.
5. Doroshkevich A.A., Bryukhanova V.V. On the effect of cloud microstructure on the polarization characteristics of double scattering lidar return // Proc. of SPIE, 21st International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 19 November 2015. – Vol. 9680. – P. 968053-1 – 968053-5. – Doi:10.1117/12.2206001.
6. Effect of the orientation degree of crystalline ice particles in cirrus on the total flow of solar radiation in the photosynthetically active range / I.V. Samokhvalov, S.V. Zuev, V.V. Bryukhanova, et al. // Proc. of SPIE, V. 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2017. – Vol. 104662B – 4 p. – Doi: 10.1117/12.2287984.
7. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 25.05.2018).
8. Единая база данных поляризационного лазерного зондирования облаков верхнего яруса: оптические и метеорологические характеристики / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, С.В. Насонов и др. // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 12/2. – С. 147–150.
9. Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Volkov S.N. Investigation of particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar // Appl. Opt. – 2004. – Vol. 43, № 36. – P. 6620–6628.

В.П. Галилейский*,
кандидат физико-математических наук;
А.И. Елизаров*,
кандидат физико-математических наук;
Д.В. Кокарев*;
Г.Г. Матвиенко*,
доктор физико-математических наук;
А.М. Морозов*

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ НАБЛЮДЕНИЙ НЕБА НА ПАНОРАМНО-ОПТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «TOMSKY»

В статье дан краткий анализ годовых круглосуточных наблюдений неба на панорамно-оптической станции «TomSky» ИОА СО РАН.

Ключевые слова: облачное поле, небосвод, полярное сияние, гало, зеркальное отражение, атмосферные ледяные кристаллы, сверхширокоугольный объектив.

ВВЕДЕНИЕ

В ИОА СО РАН создается панорамно-оптическая станция (ПОС) «TomSky» [1, 2], назначение которой – круглосуточное многопараметрическое наблюдение оптического состояния неба. В рамках проекта «TomSky» ведется разработка методов и средств оптического контроля атмосферного пространства, диагностики и прогноза состояния видимости через атмосферу, интерпретации наблюдений атмосферно-оптических явлений [3–5].

Начиная с апреля 2015 года, на панорамно-оптической станции (ПОС) «TomSky» ведется круглосуточное наблюдение. Было зарегистрировано множество интересных и необычных событий и явлений, произошедших в атмосфере и в пространстве над Томском [6–9]. Краткому рассмотрению панорамно-оптической станции и анализу зарегистрированных событий посвящена данная статья.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОС «TOMSKY»

В основе ПОС – цветная высокочувствительная цифровая камера Canon EOS 6D с матрицей CMOS разрешением кадра 5472×3648 пиксел, разрядность по свету 3×8 бит или 3×14 бит и чувствительностью ISO 50–25600. Фотокамера оснащена фотообъективом типа «Fisheye» Sigma 8 mm f/4.0 EX Fisheye, который обеспечивает обзор всего неба от горизонта до горизонта. Оптический вход станции защищен стеклянным прозрачным колпаком от атмосферных осадков и пыли. Изображения неба регистрируются в форматах «*.JPG» (сжатый, 24 бита) и «*.CR2» (исходный несжатый RAW файл, 48 бит).

Режимы регистрации изображений небосвода. Регистрация изображений небосвода производится круглосуточно, при этом экспозиционные параметры устанавливаются автоматически в зависимости от освещенности. Частота кадров строго не регламентируется и определяется как погодными условиями, так и поставленной на заданный интервал времени задачей наблюдения. Интервал варьируется от 10 мин (как правило, это плохие метеоусловия, осадки) до 30–60 сек при интересной «небесной» ситуации. Из-за ограниченности объема хранения информации изображения записываются в основном в формате «*.JPG», размеры

которых не превышают 3 Мб. В формате «*.CR2» размер файла достигает 20 Мб. Текущее изображение небосвода выкладывается на сайте ИОА (<http://sky.iao.ru>).

Периодически при хорошем состоянии звездного неба производится геометрическая калибровка поля изображения неба для возможности вычисления небесных горизонтальных координат (азимут и зенитный угол) по координатам изображения и обратно [5].

КРАТКИЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

За рассматриваемый период времени на «TomSky» было зарегистрировано большое число атмосферных, атмосферно-оптических явлений, событий, произошедших в атмосферном и заатмосферном пространстве. Среди них:

- различные типы облачности, включая серебристые облака;
- околосолнечное и окололунное гало, ложные Солнца и Луна, радуги;
- световые столбы над наземными источниками света;
- отражения наземных источников света на облачности из пластинчатых ледяных кристаллов (рис. 1);
- полярные сияния;
- запуски различного рода ракет (рис. 2);
- инверсионные следы самолетов (рис. 3);
- полеты космических спутников, ярких метеоров;
- звезды и планеты ярче $6,5^m$.

Таким образом, на ПОС может быть зарегистрировано почти все, что доступно человеческому глазу и даже несколько больше за счет большей чувствительности фотокамеры. Показательный пример этому – наблюдения отражения городских фонарей на слое облачности из ледяных кристаллов, в результате чего на небосводе, как в зеркале, отражается световая карта окружающей местности. Особенно заметно проявляются линии освещенных дорог [6–8]. По сути, это разновидность верхнего миража. Впервые такое явление на «TomSky» зарегистрировали ночью 8 сентября 2015 года (рис. 1). Особенно четко проявлялась фигура, похожая на «4», связанная на местности с пересечением близлежащих проспектов. Сопоставив расстояния на местности точек пересечения этих проспектов и их зенитные углы на изображении, удалось оценить высоту зеркального облачного слоя, которая оказалась равной $4,18 \pm 0,08$ км. На протяжении осенне-весеннего периода верхний мираж возникал, с большей или меньшей четкостью и детальностью, многократно. По мере изменения высоты облачного слоя менялись угловые размеры и положение фигур относительно линии горизонта. Найден единственный альтернативный факт наблюдения подобного явления, который был зарегистрирован в Финляндии 12 января 2016 года [10].

В процессе ночных наблюдений выяснилось следующее обстоятельство. Появление снега на грунте в условиях городского освещения резко усиливает фоновую яркость неба и придает ему оттенок, зависящий от цвета ламп. В результате, если в летний сезон можно было зарегистрировать звезды до $6,5$ звездной величины и фон неба оставался почти черным, то при появлении снежного покрова звезды слабее $5,3$ звездной величины терялись в общей фоновой засветке. С другой стороны, появление снежного покрова многократно усиливает рассеяние света вверх, что улучшает условия образования описанных выше миражей. Это подтверждает большое число наблюдений миражей в зимнее время.

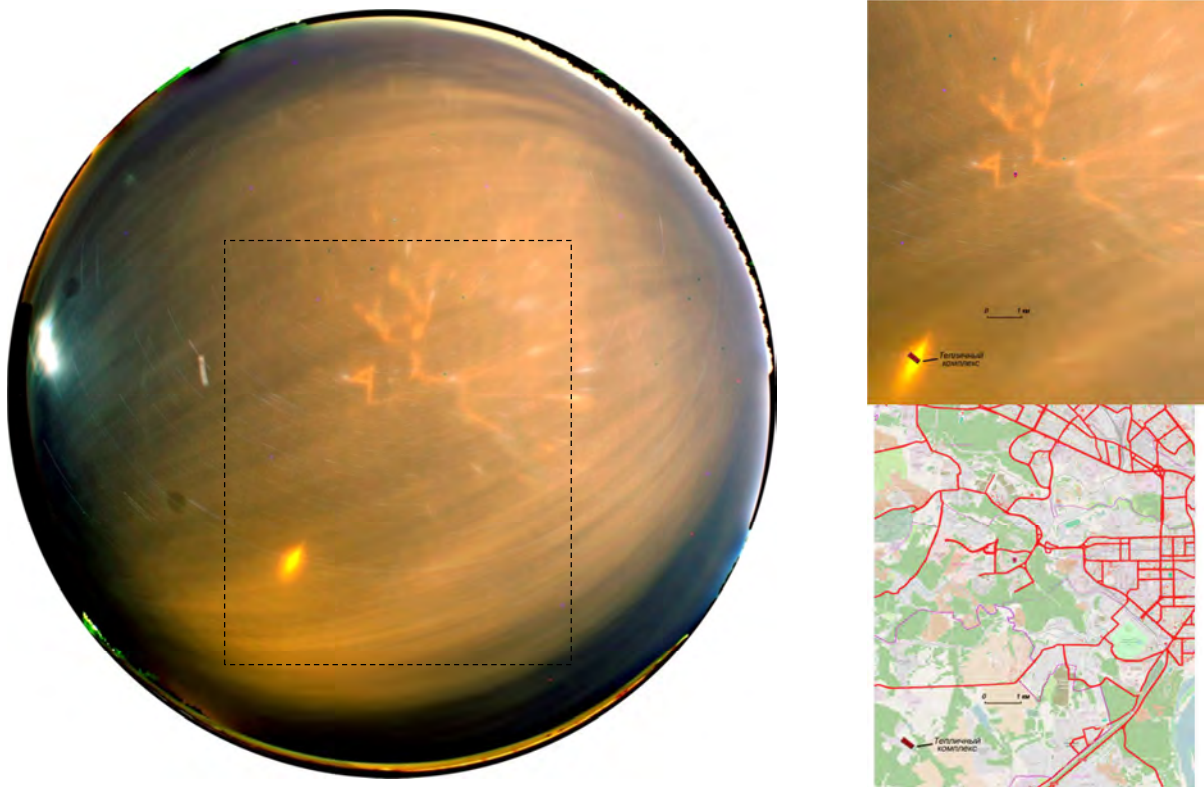



Рис.1. Панорамное изображение неба с зеркальным отражением на облачности ночью 8.09.2015. Высота облачности $4,18 \pm 0,08$ км. Справа сверху – изображение получено путем проецирования пикселей панорамного изображения на земную поверхность с равным масштабом. (Исправлены дисторсия оптической системы, перспектива, приведено к однородному масштабу.) Справа внизу – фрагмент схемы города. Символом  отмечено место расположения станции наблюдения

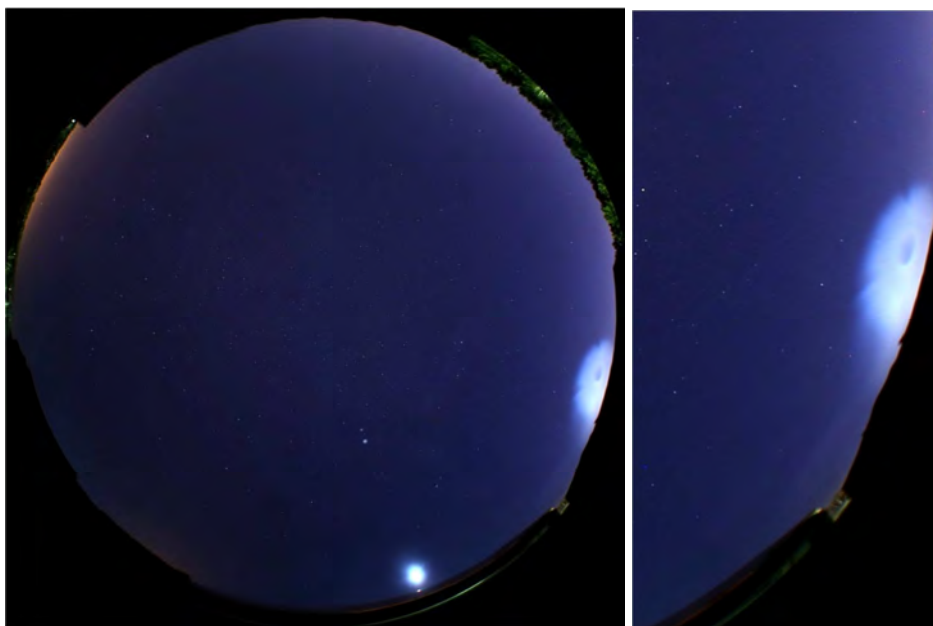


Рис.2. Наблюдение испытательного пуска межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) РС-12М «Тополь» 17 ноября 2015 года. Наблюдаемый объект предположительно находился в районе озера Балхаш

Инверсионные следы самолетов (при отсутствии облачности) хорошо заметны в сумерках, при лунном свете. В течение суток пролетающие самолеты оставляют десятки инверсионных следов. Интернет-сервисы (такие как <https://planefinder.net/> и <https://www.flightradar24.com/>) содержат информацию о расписании их полета и высоте над землей. Наблюдение за инверсионными следами позволяет отслеживать динамику воздушных потоков на этих высотах (рис. 3) **Ошибка! Источник ссылки не найден.**



Рис.3. Ветровая трансформация инверсионных следов самолетов с интервалом 6 мин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения, проводимые с помощью панорамно-оптических станций типа «TomSky», предоставляют широкие возможности для многостороннего мониторинга как оптического состояния атмосферы, так и событий, происходящих в этом пространстве.

Список используемых источников

1. Галилейский В.П., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Панорамный фотометрический комплекс для контроля прямой и рассеянной солнечной радиации. Региональный мониторинг атмосферы: Новые приборы и методики измерений: моногр. / под общ. ред. М.В. Кабанова. – Томск: изд-во «Спектр» Института Оптики Атмосферы СО РАН, – 1997. – Ч.2. – С. 146–160.
2. Галилейский В.П., Морозов А.М. Панорамный фотометрический комплекс // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6, № 9. – С. 1131–1135.
3. Cloud elements detection on the panoramic image of the sky / A.I. Elizarov, V. P. Galileiskii, D. V. Kokarev, A. M. Morozov // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 968014 (November 19, 2015). – Doi: 10.1117/12.2205321.
4. Обработка изображений облачных полей на основании спутниковых данных / А.И. Елизаров, В.П. Галилейский, Д.В. Кокарев и др. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: сб. докладов XXI Международного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. – С. В188–В191.
5. Программа определения калибровочной функции геометрического искажения сверхширокоугольных изображений по звездам (AllSky): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611444 от 3 февраля 2014 / Д.А. Сгоннов, А.М. Морозов, Д.В. Кокарев, В.П. Галилейский; правообладатель: ФГБУН ИОА СО РАН.
6. Наблюдение аномального оптического явления над городом / В.П. Галилейский, А.И. Елизаров, Д.В. Кокарев, А.М. Морозов // XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. – 71 с.

7. Наблюдение зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем из ледяных пластинок / А.М. Морозов, В.П. Галилейский, А.И. Елизаров, Д.В. Кокарев // *Оптика атмосферы и океана*. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 88–92.
8. Зеркальное отражение от атмосферных несферических частиц / В.П. Галилейский, А.И. Гришин, А.М. Морозов, В.К. Ошлаков // *Оптика атмосферы и океана*. – 1994. – Т. 7, № 9. – С. 1301–1305.
9. Зеркально отраженная компонента при рассеянии света на ледяных кристаллах с преимущественной ориентацией / В.П. Галилейский, А.Г. Боровой, Г.Г. Матвиенко, А.М. Морозов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2008. – Т. 21, № 9. – С. 773–778.
10. URL: http://spaceweathergallery.com/indiv_upload.php?upload_id=121829 (дата обращения: 06.05.2018).

О.В. Григорьева*,

кандидат техн. наук;

Д.В. Кудро*,

кандидат техн. наук;

А.Г. Саидов*

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

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МНОЖЕСТВА КЛАСТЕРОВ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

Рассматриваются варианты усовершенствования алгоритма классификации природных ландшафтов по гиперспектральным данным, основанного на применении известного метода нечеткой кластеризации Fuzzy. Повышение точности классификации достигается за счет выбора обоснованного периода съемки и оптимальных параметров кластеризации с помощью метрики Теребижа, определяющей спектральное расстояние между пикселем и обучающей выборкой, метода субтрактивной сегментации и алгоритма роя частиц. Для обоснования периода съемки, наилучшего для северо-запада России, проведен анализ закономерностей изменения спектральных характеристик растительности, типичной для этого региона в разные вегетационные фазы. Приведен пример реализации алгоритма для гиперспектральных данных, полученных с космического аппарата Ресурс-П на особо охраняемую природную территорию Березовые острова (Ленинградская обл.).

Ключевые слова: гиперспектральные данные, нечеткая кластеризация Fuzzy, метрика Теребижа, классификация, обучающие выборки, алгоритм роя частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей публикации является развитие алгоритма кластеризации нечетких S-средних для классификации растительных ландшафтов по гиперспектральным данным. Важным преимуществом гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли является возможность использования при их тематической обработке не только геометрических, но и спектрально-энергетических характеристик объектов интереса, получаемых в узких спектральных полосах электромагнитного спектра. Это позволяет не только обнаруживать объекты, но и оценивать их свойства, а также проводить более глубокую классификацию изображений. Однако возникают ситуации, когда по спектральным характеристикам (СХ) некоторые участки леса можно отнести сразу к двум или более выбранным классам. Особенно это касается смешанных типов леса (например, сосняки с березой и елью орляково-вейниково-черничные) при анализе изображения с пространственным разрешением более 30 м, когда СХ пикселя могут представлять собой нелинейную смесь спектров яркостей отдельных пород деревьев. В этом случае целесообразно использовать кластерные методы нечетких множеств Fuzzy, так как они позволяют решать задачи в условиях неопределенности [1, 2].

В свою очередь, кластеризация относится к неконтролируемым методам обработки гиперспектральных изображений, после которой необходимо идентифицировать полученные кластеры. Основная проблема использования метода кластеризации Fuzzy заключается в том, что его результаты сильно зависят от начальных значений центров классов, назначаемых по элементам нечеткой матрицы принадлежности, инициализация которых на первом шаге алгоритма осуществляется случайно. Поэтому каждый раз, запуская метод на одном и том же фрагменте изображения, можно получить совершенно разные результаты кластеризации по причине того, что задаваемая матрица принадлежности будет отличаться. При этом точность кластеризации уменьшается при обработке данных съемки, полученных в вегетационный пе-

риод, когда СХ основных типов растительности практически неразделимы. Особенно это актуально для классификации природных ландшафтов с высоким биоразнообразием растительных сообществ. Для решения этих проблем в статье рассматривается три направления усовершенствования метода нечеткой кластеризации Fuzzy.

Основными принципами построения алгоритмов, по которым осуществляется улучшение метода, является комплексирование метода субтрактивной сегментации и алгоритма роя частиц для оптимального выбора количества и центра кластеров, обеспечивающих наилучшее разбиение изображения с помощью функции спектральных расстояний между пикселем и обучающими выборками, выраженной в виде метрики Теребижа. Эти алгоритмы можно отнести к ансамблевым методам классификации в машинном обучении, позволяющим за счет объединения менее качественных алгоритмов повысить точность и устойчивость классификации при решении прикладных задач [3]. Представленные алгоритмы обеспечивают автоматизированную классификацию, а не бесконтрольное разбиение гиперспектрального изображения на кластеры.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Для верификации алгоритмов и анализа закономерностей изменения СХ лесных насаждений, характерных для бореальных (таежных) лесов, использовались многоспектральные данные космического аппарата (КА) Landsat 8 и гиперспектральные данные КА Ресурс-П. При анализе использовалась фенологическая классификация, включающая восемь вегетационных периодов, в пределах которых СХ растительности меняются незначительно [4]. Данные космической съемки были получены за все фенологические периоды на территорию заказника Березовые острова (Ленинградская обл.), ландшафт которого максимально разнообразен и наиболее типичен для физико-географических условий таежных лесов. В качестве опорной информации для определения на изображении СХ определенного класса растительности использовалась карта растительности, составленная по комплексным полевым исследованиям Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН в 2002–2006 годах. [5]. На рис. 1 показаны графики СХ основных типов леса в третий (субсезон весенней вегетации), четвертый (первая половина лета) и седьмой (основной период осени) фенологические периоды в виде коэффициентов спектральной яркости R и значений интенсивности сигнала на гиперспектральном изображении Id.

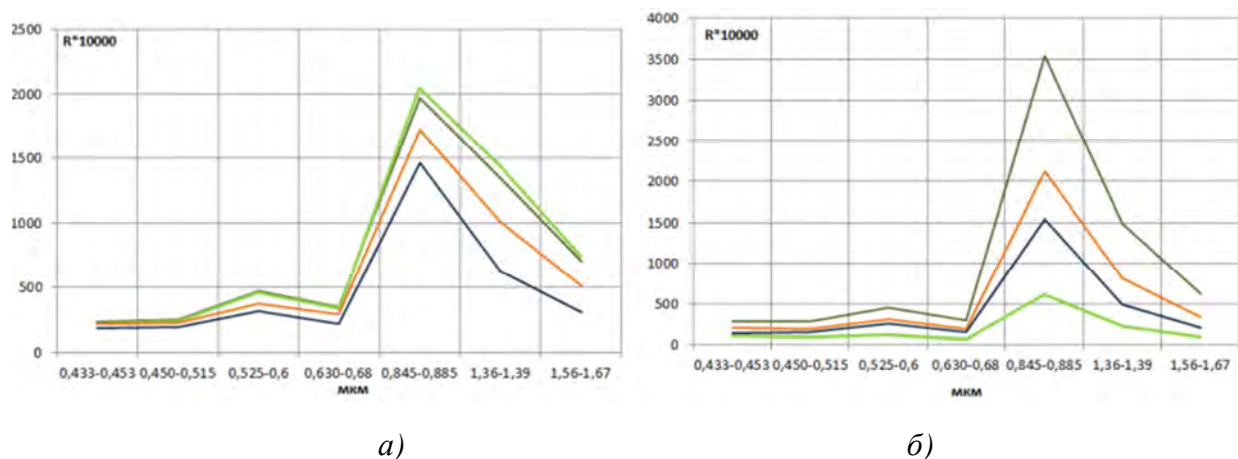


Рис. 1. Спектральные характеристики различных типов леса, полученные по результатам измерений многоспектральной аппаратурой КА Landsat 8 (а–в) и гиперспектральной аппаратурой КА Ресурс-П (г) в третий (а), четвертый (в, г) и седьмой (б) фенологические периоды (начало)



Рис. 1. Спектральные характеристики различных типов леса, полученные по результатам измерений многоспектральной аппаратурой КА Landsat 8 (а–в) и гиперспектральной аппаратурой КА Ресурс-П (г) в третий (а), четвертый (в, г) и седьмой (б) фенологические периоды (окончание)

Анализ измеренных СХ показал, что для классификации ландшафтов рекомендуется использовать данные, полученные на временном интервале от субсезона весенней вегетации до основного периода осени (листопада). В соответствии с этим в качестве гиперспектральных изображений для апробации разработанного алгоритма использовались материалы съемки, полученные гиперспектральной аппаратурой КА Ресурс-П 30 мая, что соответствует четвертому вегетационному периоду для данного региона. При этом даже визуальный анализ графиков КСЯ, полученных за этот период по гиперспектральным данным, показывает преимущества их использования перед многоспектральными данными для разделения классов растительности за счет более высокого спектрального разрешения (рис. 1,г).

АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТРИКИ ТЕРЕБИЖА (НКТ)

В первом варианте усовершенствованного алгоритма центры кластеров определялись не случайным образом, как в стандартном алгоритме кластеризации Fuzzy, а по обучающим выборкам. Для этого инициализация матрицы функций принадлежности U , определяющей степень принадлежность i -го пикселя k -му кластеру, осуществляется следующим образом:

1. Рассчитывается расстояние между центром класса $R_k^3 = \{r_{kl}^3\}$ и каждым вектором яркости пикселя $R_i = \{r_{il}\}$, где l – номер спектрального канала.

В стандартном алгоритме для оценки расстояния от пикселя до кластера используется расстояние Евклида, что для растительности не всегда оправданно. Использование данной меры справедливо только в том случае, если между спектральными сигнатурами объекта и фона не наблюдается инверсии, так как в качестве критерия принадлежности пикселя к кластеру используется сумма квадратов разностей. Для анализа состояния растительного покрова, представляющего собой сложные комплексы объектов с различными спектральными отражательными свойствами на изображениях, эффективнее будет использовать расстояние Махаланобиса, однако в случае гиперспектральных данных могут возникнуть проблемы об-

ращения ковариационной матрицы. Поэтому было предложено в качестве меры расстояния использовать метрику Теребижа:

$$d_{ik} = \sum_{\lambda_i}^{\lambda_n} (R_i(\lambda) - R_k^3(\lambda))^2 / R_k^3(\lambda). \quad (1)$$

В результате из d_{ik} формируется матрица D размером $n \times p$, где n – количество кластеров, p – количество пикселей гиперспектрального изображения.

2. Рассчитываются элементы матрицы функций принадлежности U :

$$u_{ik} = t_{ik} / (1_n \sum_{k=1}^n t_{ik}),$$

где $t_{ik} = d_{ik}^{-2/(m-1)}$ образуют матрицу T (m – фаззификатор).

3. Оценивается целевая функция, которую необходимо минимизировать:

$$F = \sum_{i=1}^p (\sum_{k=1}^n d_{ik}^2 u_{ik}^m).$$

4. Если не будет выполнено количество заданных итераций и не будет достигнута заданная точность классификации ε : $|F(j) - F(j-1)| \leq \varepsilon$, то рассчитываются новые центры классов по формуле

$$r_{kl}^3 = \sum_{i=1}^p (u_{ik}^m r_{il}) / \sum_{i=1}^p u_{ik}^m,$$

и действия п. 1–3 повторяются.

АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ СУБТРАКТИВНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ (НКСС)

В данном варианте алгоритма нечеткой классификации средние начальные значения кластеров определяются в результате субтрактивной сегментации, которая предполагает, что каждая точка данных является центром потенциального кластера. При сегментации рассчитывается мера возможности каждой точки данных представлять центр кластера. Мера основана на оценке плотности точек данных вокруг соответствующего центра кластера [6]. В качестве основных исходных данных задаются радиусы центров кластеров rad , при уменьшении значений которых находится меньшее значение кластеров. Размер вектора радиусов rad соответствует количеству спектральных каналов гиперспектрального изображения. Таким образом, оптимальное количество кластеров определяется в результате рассматриваемой сегментации. Для разрабатываемого алгоритма НКСС величина rad задается так, чтобы количество кластеров было больше обучающих выборок. Это позволяет исключить ошибки, связанные с переобучением классификатора, когда дешифровщик назначает обучающие выборки двух классов, СХ которых не различимы в исследуемом диапазоне длин волн.

Например, результаты работы алгоритма показали, что при $rad=0,2$ количество кластеров для 12 спектральных каналов оказывается равным 12, а при $rad=0,1$ – равным 43.

Дальнейшая последовательность реализации алгоритма аналогична алгоритму НКТ с той разницей, что вместо спектрального вектора эталона R_k^3 используются средние начальные значения кластеров, установленные в результате субтрактивной сегментации.

В результате формируется нераспознанная карта кластеризации. Непосредственное распознавание выделенных кластеров предлагается осуществлять следующим образом.

1. Находится центр каждого кластера и для каждого из них формируется выборка наиболее близко расположенных к этому центру пикселей, объем которых соответствует размеру обучающих выборок. Далее для каждой выборки кластеров снова находится среднее значение КСЯ $R_{cluster}$.

2. Для каждой обучающей выборки находится среднее значение КСЯ R_{learn} .

3. Оценивается степень принадлежности кластера $R_{cluster}$ к выборке R_{learn} с помощью метрики Теребижа по формуле (1). Кластер относится к тому классу растительности, значение расстояния до которого минимально. Если находится два кластера, принадлежащих одному классу, то они объединяются.

АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАЗБИЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА РОЯ-ЧАСТИЦ (НКРЧ)

Третий вариант является наиболее сложным и заключается в итерационной процедуре поиска оптимального разбиения на кластеры, которое определяется параметром rad субтрактивной сегментации. В качестве целевой функции оптимизации может выступать сумма квадратов расстояний от каждого эталона до ближайшей выборки кластера:

$$F = \sqrt{\sum_{k=1}^n T_k^2} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Данная функция строится следующим образом.

1. Реализуется процедура субтрактивной сегментации для определения центров кластеров при заданном радиусе rad .

2. Осуществляются пункты 1 и 2 одного шага алгоритма НКТ, в результате которой инициализируем первую матрицу функций принадлежности U . В соответствии с этой матрицей получаем первое разбиение гиперспектрального изображения на кластеры.

3. Проводится распознавание кластеров по метрике Теребижа в соответствии с последовательностью, описанной в алгоритме НКСС.

4. Оценивается функция оптимизации F в соответствии с формулой (2).

Так как используемая целевая функция является достаточно сложной и в явном виде не зависит от оптимизируемого параметра радиуса центра кластеров rad , обеспечивающего субоптимальное разбиение гиперспектральных данных, к ней трудно применимы классические методы оптимизации. Поэтому в данном алгоритме определение оптимального радиуса rad предлагается осуществлять на основе алгоритма роя частиц (particle swarm optimization, PSO-алгоритм), относящегося к поисковым алгоритмам стохастической оптимизации, в которых поиск решения осуществляется по всему пространству [7, 8]. В качестве исходных данных алгоритма задается вектор возможных значений параметров оптимизации rad , определяющих количество и первоначальное положение роя частиц. Например, rad может меняться от 0 до 1 с шагом 0,1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотренные варианты алгоритмов были реализованы программно и протестированы с использованием гиперспектральных данных КА Ресурс-П, полученных на особо охраняемую природную территорию Березовые острова. Результаты тестирования показали, что все варианты усовершенствования метода кластеризации Fuzzy приводят к практически одинаковым результатам, которые по точности превышают исходный метод. На рис. 2 приведена полученная в результате реализации алгоритма карта растительных ландшафтов.

Классификация и оценка точности результатов работы алгоритма осуществлялась с использованием соответственно обучающих и тестовых выборок, полученных из карты растительности [5]. В табл. 1 приведена матрица оценок классификации, которая позволяет увидеть долю ошибок классификации первого (ложный пропуск) и второго (ложное обнаружение) рода, а также рассчитать интегральный индекс точности классификации Каппа – Коэна [9]. При этом ошибки связаны только с отнесением «сосново-пушицево-

кустарничково-сфагновых болот» к классу «сосняков», которые в обоих классах являются преобладающей породой, а также «березняков с сосной» к «соснякам черничным». Последнее можно обосновать тем, что с момента формирования карты растительности, по которой были получены обучающие выборки, прошло более 10 лет и за этот период наблюдается сукцессия березняков с естественной сменой сообщества «березняки, часто с сосной, черничные и чернично-травяные» на «сосняки черничные». Не учитывая эти ошибки, индекс Каппа – Коэна для рассматриваемой реализации алгоритма составил 0,7 по сравнению с исходным методом Fuzzy, для которого этот индекс изменялся от 0,3 до 0,6 в зависимости от инициализации начальных центров кластеров.

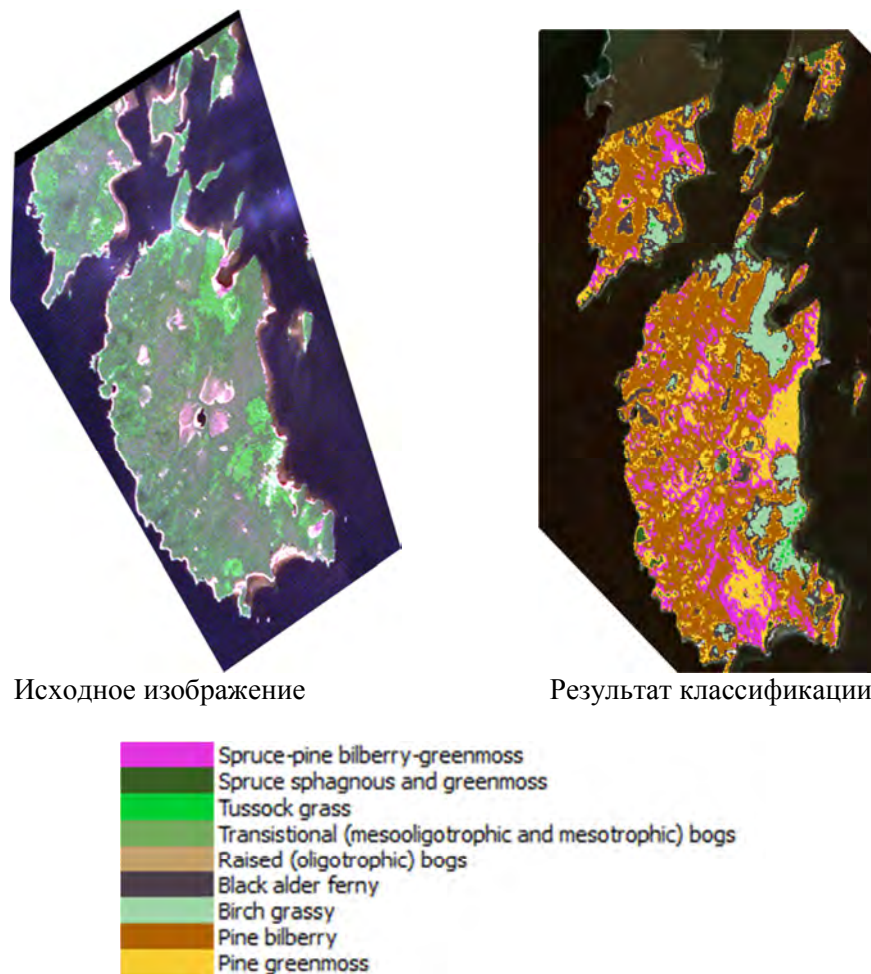


Рис. 2. Карта результатов классификации растительных ландшафтов, полученная с помощью разработанного алгоритма

Таблица 1

Матрица оценок результатов классификации

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	38,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,35	20,11
2	0,00	70,03	0,00	0,00	29,97	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	45,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	54,35	0,44	0,00	16,30	28,91
5	2,05	0,00	0,00	7,44	35,05	0,00	49,78	5,69
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,27	0,00	8,73
7	15,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,91	13,78
8	20,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,53	54,54

Примечание: 1 – елово-сосновые чернично-зеленомошные и сфагновые; 2 – луговая растительность; 3 – сосново-пушицево-кустарничково-сфагновые болота; 4 – черноольховые леса; 5 – березняки щучковые и черничные, встречаются с сосной; 6 – ельники чернично-зеленомошные; 7 – сосняки черничные; 8 – сосняки зеленомошные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность использования метода Fuzzy для определения основных классов лесной растительности по гиперспектральным данным дистанционного зондирования Земли, но при соответствующей доработке. Показано, что для успешной классификации метод нечеткой кластеризации Fuzzy целесообразно комбинировать с алгоритмами субтрактивной сегментации и стохастической оптимизации, позволяющими выбрать оптимальные параметры кластеризации и обеспечивающими повышение точности и устойчивость разбиения изображения на классы. Повышение точности классификации также обеспечивается выбором обоснованного фенологического периода съемки.

Практическое применение разработанного алгоритма не ограничивается исследованием природных естественных ландшафтов. Перспективно его использование для классификации и изучения состояния сельскохозяйственных полей, а также урбанизированных территорий по гиперспектральным данным космической съемки. Дальнейшие исследования предполагается выполнить при решении вопросов разработки соответствующих алгоритмов.

Список используемых источников

1. *Bezdec J.C.* Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. – New York: Plenum Press, Springer, 1981. – 267 p.
2. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 556 с.
3. Multiple Classifier Systems / J. Kittler & F. Roli (editors) // Proc. of 2nd International Workshop, MCS2001, Cambridge, UK, 2-4 July 2001) / Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 2096. Springer-Verlag, Berlin.
4. *Григорьева О.В., Чанурский Л.И.* Проблемы создания и информационного наполнения базы данных по коэффициентам спектральной яркости объектов наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т.9, №3. – С. 18–25.
5. Природная среда и биологическое разнообразие архипелага Березовые острова (Финский залив). – СПб., 2007. – 368 с.
6. *Chiu S.* Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 1994. – Vol. 2., №3 – P. 267–278.
7. *Jun Sun, Choi-Hong Lai, Xiao-Jun Wu* Particle Swarm Optimisation: Classical and Quantum Perspectives. – CRC Press, 2011. – 419 p.
8. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
9. *Лурье И.К., Косиков А.Г.* Теория и практика цифровой обработки изображений // Дистанционное зондирование и географические информационные системы / под общ. ред. А.М. Берлянта. – М.: Научный мир, 2003.

Д.А. Денисенков*;

В.Ю. Жуков*,

кандидат техн. наук;

Г.Г. Щукин*,

доктор физико-математических наук, профессор

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

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ВЕТРА ПО НАПРАВЛЕНИЮ В ДОПЛЕРОВСКОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ

Описывается эксперимент по подтверждению возможности измерения вертикального сдвига ветра по направлению на основе анализа спиралей малых значений параметра на картах распределения ширины спектра сигнала по коническому разрезу, получаемых ДМРЛ. Приводятся основные полученные результаты.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, сдвиг ветра, ширина спектра сигнала.

Сдвиг ветра – изменение скорости и/или направления ветра в пространстве. Это скрытое и труднопредсказуемое явление. Для воздушного судна сдвиг ветра является опасным явлением, причем наибольшую опасность представляет вертикальный сдвиг ветра. При высотных полетах резкое изменение скорости и направления ветра приводит к проваливанию (воздушные ямы), но наибольшую опасность для воздушного судна представляет встреча с данным явлением на малых высотах (до 500 м). Для оперативного обнаружения этого опасного явления разработано большое количество специализированного оборудования [1]: лидары, содары, радиолокаторы и радиоакустические измерители. Все они обладают общим недостатком – невозможностью работать при любых погодных условиях. Для обеспечения всепогодности ИСАО рекомендует использовать комбинацию лидарного и радиолокационного профиломеров. Первый работает в «чистой атмосфере», второй – при наличии в воздухе гидрометеоров или иных элементарных отражателей. Практически все названные приборы являются ветровыми профайлерами, использующими информацию о средней радиальной скорости ветра.

Часто наблюдается ситуация, при которой в метеослужбе аэропорта отсутствует специализированный радиолокационный профиломер, при этом установлен современный доплеровский метеорологический радиолокатор, который может обнаруживать сдвиг ветра в пограничном слое атмосферы по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала. Известен метод обнаружения сдвига ветра по характерным особенностям в распределении областей аномально широкого спектра [2, 3]. Если аномально широкий спектр отсутствует, то оценка величины сдвига ветра по направлению возможна по спиральям малых значений ширины спектра, что было теоретически обосновано [4]. Для подтверждения этого был проведен эксперимент.

Как правило, для экспериментальной проверки новой методики обнаружения сдвига ветра метеорологическим радиолокатором в качестве опорных данных используются результаты аэрологического зондирования [5–7], при этом выявляется серьезный недостаток – существенное уменьшение величины выборки вследствие малой частоты выпусков аэрозондов (2 раза в сутки). В результате из всех радиолокационных данных приходится оставлять не более 5 %, что ведет к уменьшению достоверности полученных результатов.

В эксперименте, результаты которого представлены в данной работе, величина сдвига ветра оценивается по направлению в слое Экмана [8]. Согласно теории, ветер в этом слое поворачивает по часовой стрелке (против нее) с увеличением высоты в Северном (Южном) по-

лушарии. На практике выявлено [8], что «нормальный» сдвиг ветра (т. е. без воздействия особых метеорологических явлений) на высотах от поверхности земли до, примерно, 600 м является комбинацией логарифмического профиля скорости ветра и профиля направления ветра, описываемого спиралью Экмана (рис. 1). Этот факт позволяет провести эксперимент, не привлекая информацию от других измерителей вертикального профиля ветра.

Оценка величины сдвига ветра по направлению на основе анализа спиралей малых значений параметра на картах распределения ширины спектра сигнала по коническому разрезу, получаемых ДМРЛ-С, производилась в слое до высоты 400 м, поскольку он характеризуется максимальным градиентом направления ветра (рис. 1). Теоретически рассчитанное среднее значение в данном слое $\alpha_{\text{теор}} = 0,12$ град./м.

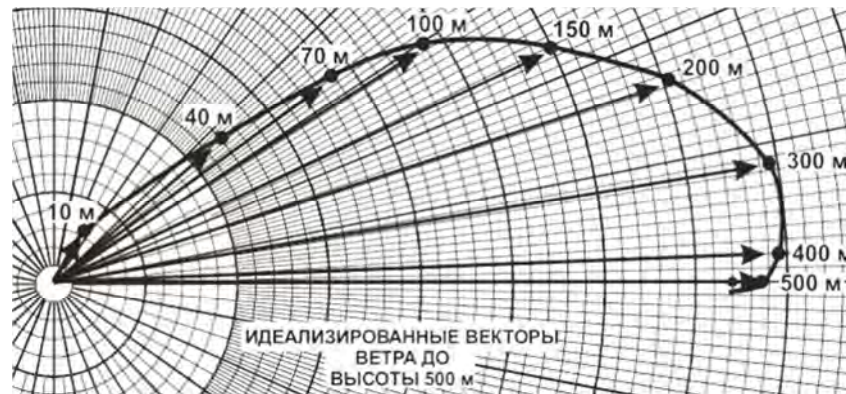


Рис. 1. Спираль Экмана

Будем считать, что ветер в атмосфере слоисто однороден [4]. Данное предположение справедливо в большей части облачной атмосферы за исключением центральных областей интенсивных мощно-кучевых облаков [14]. Зададим такую модель атмосферы, в которой скорость $v(h)$ и направление ветра $\varphi(h)$ изменяются с высотой по линейному закону:

$$\begin{cases} v(h) = v_0 + \alpha h \\ \gamma(h) = \gamma_0 + kh \end{cases} \quad (1)$$

где v_0 – скорость ветра на нулевой высоте;
 α – градиент скорости ветра по высоте;
 γ_0 – направление ветра на нулевой высоте;
 k – градиент направления ветра по высоте.

Известно, что минимальная ширина спектра радиальных скоростей гидрометеоров на карте образуется при азимутах антенны, параллельных направлению ветра [4]. Следовательно, спираль малых значений совпадает со спиралью максимума средней радиальной скорости v_r . Поэтому для расчета величины сдвига ветра по направлению при помощи спирали малых значений ширины спектра логично воспользоваться выражением для средней радиальной скорости гидрометеоров. Последняя рассчитывается по формуле

$$v_r = v(h) \cos(\beta) \cos(\varphi - \gamma(h)), \quad (2)$$

где φ – азимут антенны;
 β – угол места антенны.

С учетом (1) выражение для v_r имеет следующий вид:

$$v_r = (v_0 + \alpha h) \cos(\beta) \cos(\varphi - \gamma_0 - kh). \quad (3)$$

Дифференцируем данное выражение по h и находим экстремум:

$$\operatorname{tg}(\phi_0 + kh - \gamma) = \frac{\alpha}{k(v_0 + ah)}. \quad (4)$$

Вводим обозначение

$$x = \phi - \gamma_0 + kh. \quad (5)$$

С учетом того, что скорость ветра на поверхности земли $v_0=0$, выражение (4) принимает следующий вид:

$$\operatorname{tg} x = \frac{1}{x - (\phi - \gamma_0)}. \quad (6)$$

Пример графического решения данного уравнения приведен на рис. 2.

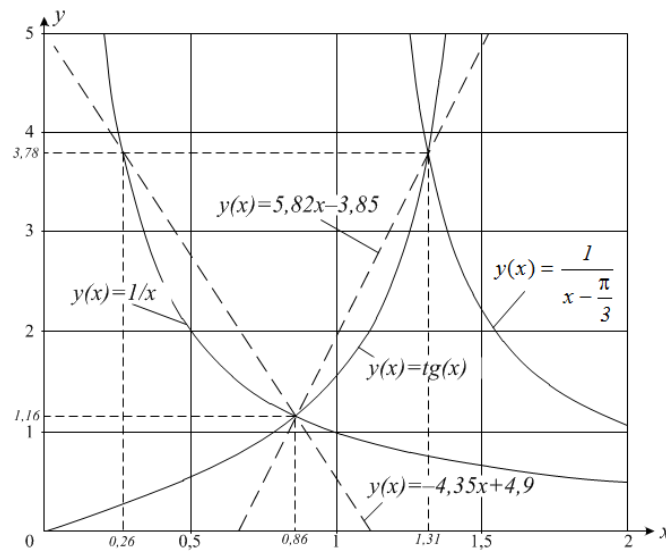


Рис. 2. Графическое решение уравнения (5)

Направление ветра в слое Экмана изменяется на угол не более $\pi/3$. На этом малом участке возможна линейная аппроксимация левой и правой частей уравнения (6):

$$y_1(x) = 5,82x - 3,85; \quad (7)$$

$$y_2(x) = -4,35[x - (\phi - \gamma_0)] + 4,9. \quad (8)$$

В результате оно преобразуется к виду

$$10,17 kh = -5,82\phi + 8,75 - 5,82. \quad (9)$$

Далее на карте распределения ширины спектра радиальных скоростей частиц по конечному разрезу, полученной с ДМРЛ-С, выбираются две точки на спирали малых значений параметра (рис. 3). Одна – на высоте 100 м, другая – на высоте 500 м. Координаты этих точек (азимут ϕ и высота h) подставляются в выражение (9), и вычисляется средняя величина сдвига ветра по направлению k [град./м]:

$$k = 0,57 \frac{\phi_1 - \phi_2}{h_1 - h_2}, \quad (10)$$

где ϕ_1, ϕ_2 – азимуты первой и второй точек на спирали малых значений ширины спектра;
 h_1, h_2 – высота первой и высота второй точек на спирали малых значений ширины спектра.

В эксперименте анализировались данные, полученные с радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в г. Валдай (Новгородская область), за период с 1 декабря 2011 года по 28 февраля 2012 года. Из всей выборки были выбраны 60 карт, на которых четко прослеживалась спираль малых значений ширины спектра. Для каждой производился расчет величины сдвига ветра по направлению по формуле (10). Среднее значение измеряемой величины $k_{ср} = -0,12$ град./м с СКО=0,06 град./м. Данная величина хорошо согласуется с теоритически рассчитанной по спирали Экмана.

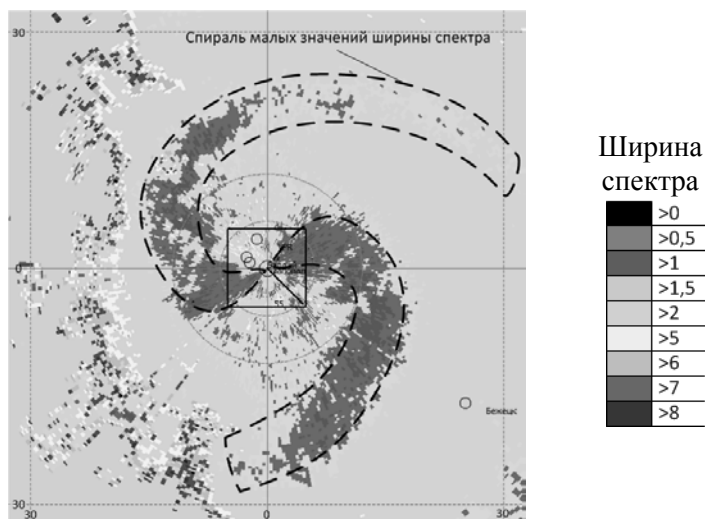


Рис. 3. Спираль малых значений ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент показал, что оценка величины вертикального сдвига ветра по направлению возможна на основе анализа карт распределения ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров, получаемых с метеорологического радиолокатора. Данные, полученные в результате эксперимента, хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Реализация результатов, полученных в данном исследовании, в совокупности с результатами, полученными ранее, позволит восстанавливать вертикальный профиль ветра в исследуемом объеме пространства по оценкам ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров.

Список используемых источников

1. Восстановление поля скорости воздушных потоков в метеорологической доплеровской радиолокации / А.М. Девяткин, Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков и др. // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 1. – С. 107–115.
2. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Р.В. Первушин, Г.Г. Щукин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 3 (23). – С. 68–73.
3. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – № 12/2. – С. 15–19.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Определение величины сдвига ветра по направлению с помощью карт ширины спектра радиолокационного сигнала // Сборник трудов VII Всероссийских Армандовских чтений «Современные проблемы дистанционного зондирования, ра-

диолокации, распространения и дифракции радиоволн». – Муром: ВлГМУ, 2017. – С. 402–406.

5. Верификация метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, О.А. Сивак, Г.Г. Щукин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 653. – С. 159–163.

6. Исследование эффективности метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, О.А. Сивак, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2016. – № 42. – С. 109–116.

7. Экспериментальная проверка метода определения сдвига ветра по ширине спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков, М.А. Жданова, В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2016. – № 45. – С. 113–118.

8. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах: руководящий документ. – Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2008. – 258 с.

9. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты / И.А. Готюр, В.Ю. Жуков, Ю.В. Кулешов и др. // Ученые записки РГГМУ. – 2011. – № 21. – С. 66–75.

А.П. Доронин*,
доктор техн. наук, профессор;
А.С. Тимощук*,
кандидат техн. наук;

П.В. Шабалин*

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ ПО ДАННЫМ ЗА 2017 ГОД

Представлены результаты исследования метеорологических условий, повлиявших на формирование высоких уровней загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге в 2017 году. Сопоставлены данные метеорологических приземных наблюдений, температурно-ветрового зондирования атмосферы, спутниковых снимков и данные автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга за синхронные сроки наблюдений. Определены основные источники и причины возникновения повышенных уровней загрязнения атмосферы, которые рекомендуется учитывать при осуществлении городских мероприятий по охране атмосферного воздуха.

Ключевые слова: неблагоприятные метеорологические условия, синоптические ситуации, загрязнение атмосферного воздуха, автоматизированная система мониторинга атмосферного воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения свыше 92 % жителей планеты проживают на территориях с уровнем загрязнения атмосферного воздуха, превышающим официальные пределы безопасности [1]. Каждый год 6 млн людей в мире умирают непосредственно из-за загрязнения воздуха, из них порядка 140 тыс. – граждане Российской Федерации. Как правило, такие уровни загрязнения воздуха возникают из-за слишком большой концентрации на сравнительно незначительной площади большого числа жителей, транспорта, различных производств и промышленных предприятий, что характерно для крупных городов с населением более 100 000 человек, где, по сути, проживает практически половина населения планеты.

К сожалению, экологическая проблема загрязнения атмосферного воздуха характерна и для Санкт-Петербурга. Такие негативные факторы, как загрязненность воздуха выбросами от стационарных и передвижных источников, перенаселенность, шум приводят к ухудшению качества жизни в городе и ухудшению состояния здоровья петербуржцев. Так, например, загрязнение атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге является причиной общего снижения иммунитета, постоянного роста аллергических и астматических заболеваний, особенно у детей и пожилых людей. В 2016 году Санкт-Петербург признан одним из самых загрязненных городов России – выбросы в воздух составляют около 530,2 тыс. т в год [2]. Основным источником загрязнения является автомобильный транспорт – на его долю приходится около 86 % выбросов. Указанные факторы говорят о том, что исследование причин образования высоких уровней загрязнения атмосферного воздуха, методов прогнозирования их возникновения, а также разработка методов и способов борьбы с данным негативным явлением являются весьма актуальными задачами. Исходя из этого, ниже представлены результаты исследования метеорологических условий, повлиявших на формирование высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге по данным за 2017 год.

Загрязнение воздушной среды формируется под влиянием переноса загрязняющих веществ с сопредельных территорий, а также под влиянием выбросов подвижных и стационарных источников. На территории Санкт-Петербурга промышленной деятельностью занимаются порядка 1291 предприятий (порядка 40 тыс. стационарных источников), плотность выбросов загрязняющих веществ на душу населения составляет в среднем 135,9 кг/год, а на единицу площади – 434,5 т/км². В городе зарегистрировано примерно 1 676 379 единиц автотранспорта. Около 86 % всех выбросов приходится на автотранспорт, этот показатель имеет постоянную тенденцию роста за счет увеличения количества автотранспортных средств [2]. Поэтому высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха отмечается вблизи крупных автомагистралей (кольцевой автодороги) и промышленных зон. Наибольший уровень загрязнения, в частности, диоксидом азота (до 3 ПДК_{мр} – предельно допустимая концентрация максимально разовая), наблюдается в Адмиралтейском, Калининском и Красносельском районах; оксида азота (до 2,3 ПДК_{мр}) – в Центральном и Красногвардейском районах, оксидов углерода (до 3,9 ПДК_{мр}) – в Центральном, Приморском, Кировском и Невском районах. Кратковременные, но значительные концентрации бензола наблюдаются во Фрунзенском (до 6,6 ПДК_{мр}), Невском (до 5,5 ПДК_{мр}), Красногвардейском (до 5,5 ПДК_{мр}) районах. На отдельных оживленных перекрестках ПДК может достигать 8 единиц [2].

В Санкт-Петербурге под эгидой Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности создана Автоматизированная система мониторинга (АСМ) атмосферного воздуха, которая предназначена для обеспечения потребностей органов государственной власти, органов местного самоуправления, организаций и населения города информацией о состоянии атмосферного воздуха [3].

АСМ состоит из 25 автоматических станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, 2 стационарных постов наблюдений, 3 передвижных лабораторий мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. Станции АСМ расположены в 18 административных районах Санкт-Петербурга, функционируют непрерывно в автоматическом режиме и обеспечивают регулярное получение оперативной информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха города основными загрязняющими веществами (ЗВ). Автоматические измерения концентрации ЗВ проводятся с периодичностью 20 мин, и данные размещаются на экологическом портале Санкт-Петербурга.

Загрязнение приземного слоя воздуха в значительной степени зависит от синоптической обстановки (ситуации) и фактических метеорологических условий. В отдельные периоды года, когда неблагоприятные метеорологические условия (НМУ) способствуют накоплению опасных ЗВ в приземном слое атмосферы, концентрации вредных примесей в воздухе могут резко возрасти и значительно превышать ПДК. Такие условия, как правило, складываются при формировании обширных антициклонов и барических гребней, связанных с ними. Эти барические образования нарушают естественное движение воздушных масс (ВМ) в зональном (широтном) направлении и способствуют возникновению так называемого меридионального переноса воздуха в долготном направлении. В тех случаях, когда антициклоническая циркуляция воздуха устанавливается на длительный срок (более 5–7 суток), такие антициклоны принято считать блокирующими.

Для антициклонов (барических гребней) характерно формирование инверсий и изотермий (отклонений от адиабатичности), что обусловлено способностью различных участков земной поверхности поглощать или излучать тепло, вследствие этого возникает аномальное вертикальное распределение температуры в приземном слое атмосферы, точнее, ее нижней части – тропосфере. Таким образом, для инверсии характерно повышение температуры с высотой, а изотермия характеризуется ее ровным ходом. Инверсия температуры (изотермия) может наблюдаться как у поверхности земли – приземная инверсия (нижняя граница совпадает с земной поверхностью), так и на высотах – приподнятая инверсия (нижняя граница расположена на некоторой высоте). Слои с изотермией и инверсией температуры являются задержи-

вающими слоями для динамической турбулентности и конвекции, что в значительной степени способствует накоплению вредных примесей в приземном слое тропосферы.

В мегаполисах повторяемость и приземных, и приподнятых инверсий достаточно высокая. Так, по результатам синоптических и аэрологических наблюдений в Санкт-Петербурге анализировались особенности вертикальных профилей температуры (стратификации) в нижнем слое атмосферы до 500 м в зависимости от различных синоптических ситуаций. Основные типы синоптических ситуаций были разделены на 15 групп в соответствии с термическим состоянием воздушных масс и в зависимости от скорости приземного ветра. Определено, что наиболее неблагоприятные ситуации складываются в условиях блокирующих антициклонов (барических гребней), при которых нижняя граница инверсии располагается над источником загрязнения. Если при такой метеорологической обстановке в атмосферу интенсивно поступают ЗВ, то может возникнуть зона опасных загрязнений, сохраняющаяся длительный период времени (от нескольких часов до нескольких суток).

В последнее время в условиях антициклонического типа погоды часто наблюдаются высокие уровни загрязнения атмосферы в северном и юго-западном направлениях Санкт-Петербурга, которые происходят при умышленном или самопроизвольном возгорании мусора на Левашовской свалке (полигон «Новосёлки»), Волхонской свалке (полигон «Южный»), а также при сложных дорожно-транспортных условиях. Последний раз такая сложная экологическая ситуация в Санкт-Петербурге зафиксирована в начале ноября 2017 года, когда наблюдалось заметное ухудшение видимости, едкий удушающий запах гари, присутствие в воздухе частиц сажи. Данные визуальные наблюдения согласуются с результатами статистической обработки данных АСМ, проведенной авторами за 2017 год. На рис.1 показаны выборочные результаты проведенной статистической обработки данных АСМ Санкт-Петербурга за ноябрь 2017 года.

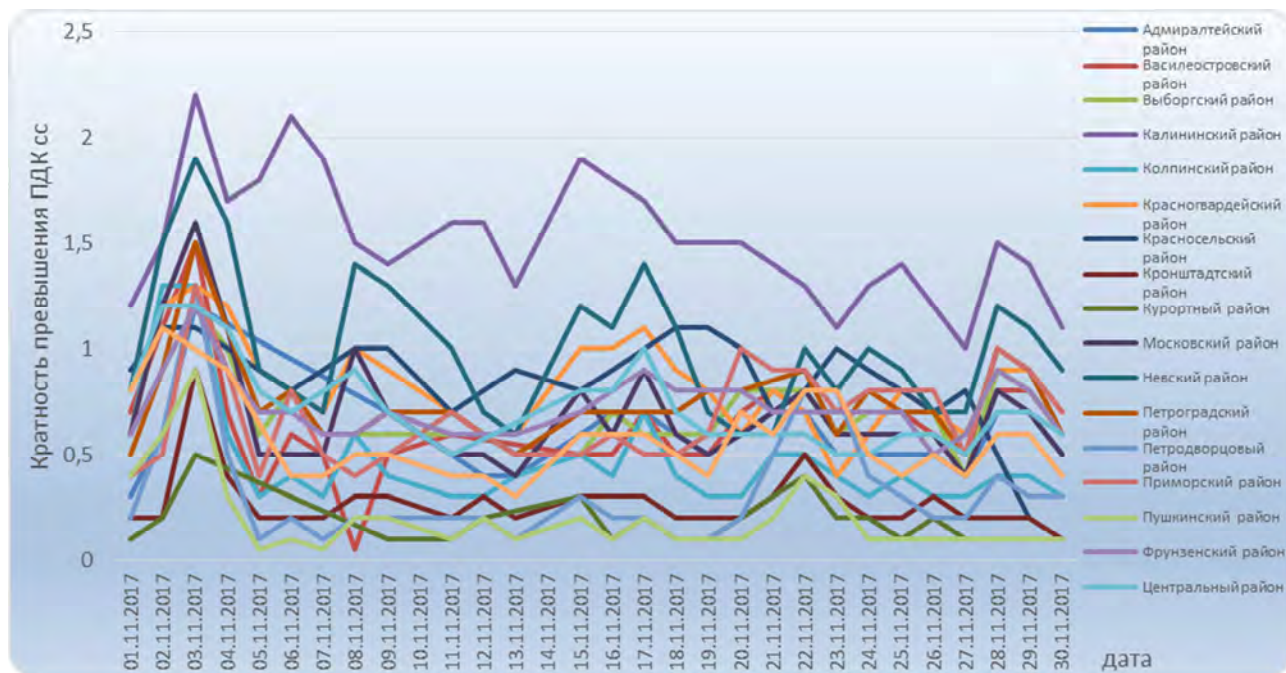


Рис. 1. Динамика изменения концентраций диоксида азота за ноябрь 2017 г. по данным Автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха (в ед. ПДК с.с.)

Особенно высокие превышения ПДК были зафиксированы станциями АСМ 3.11.2017 во всех районах города по диоксиду азота (рис. 1), в связи с чем на примере этой даты разобрана синоптическая ситуация и приведены данные приземного, аэрологического и нефанализа, демонстрирующие характерные для данных уровней загрязнения воздуха НМУ. В этот пери-

од в Санкт-Петербурге синоптическая ситуация (рис. 2) была обусловлена гребнем антициклона, центр которого располагался южнее Вены, а атмосферное давление в центре антициклона составляло 1020 гПа.

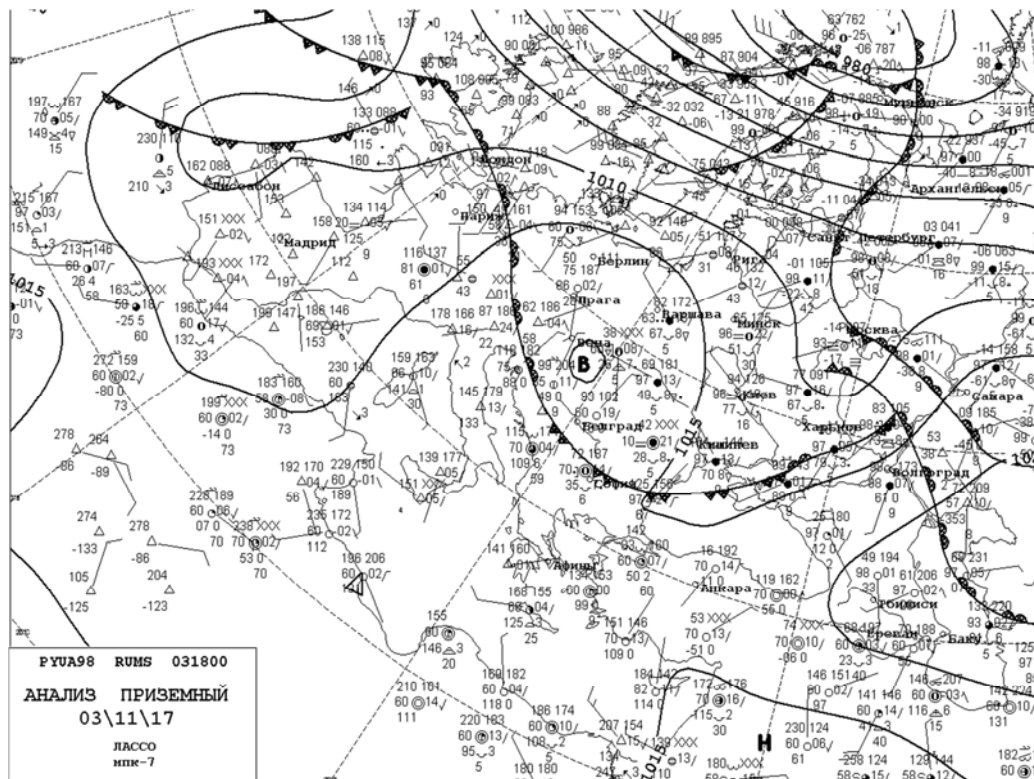


Рис. 2. Фрагмент карты приземного анализа за 03.11.2017

По результатам утреннего температурно-ветрового зондирования на ст. Воейково в городе и пригородах наблюдались две приподнятых инверсии температуры (рис. 3). С самой нижней из них, расположенной на высоте около 200 м и имеющей контраст температур $5,5^{\circ}\text{C}$, была связана низкая слоистообразная облачность. К тому же экологическая обстановка усугублялась слабым ветром юго-восточного направления.

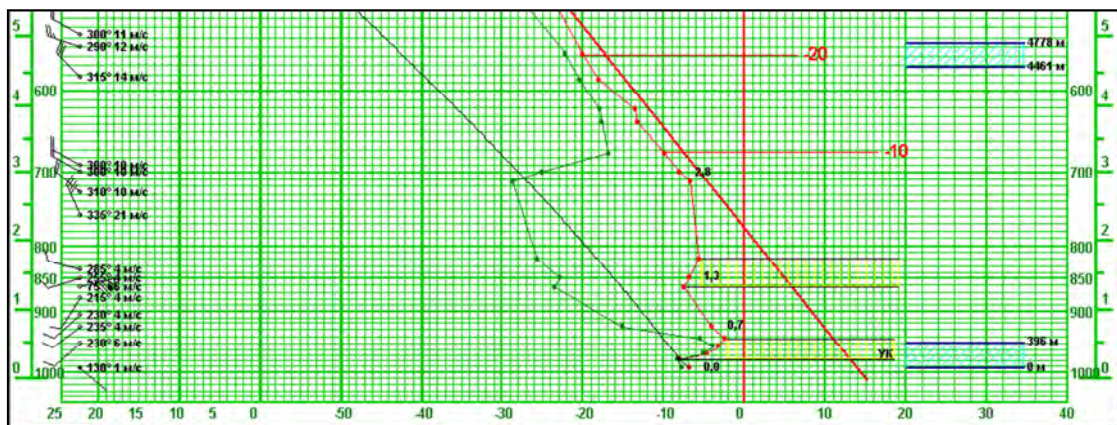


Рис. 3. Фрагмент аэрологической диаграммы за 03.11.2017, соответствующий 03.00

Для совместного анализа метеорологической и экологической обстановки помимо анализа синоптической и аэрологической информации целесообразно также привлекать и оперативную космическую информацию в виде полутонных изображений (снимков) подстилающей

поверхности и облачного покрова, получаемых как со специализированных метеорологических искусственных спутников Земли, так и со спутников дистанционного зондирования Земли. В качестве примера на рис. 4 представлен снимок Северо-Западного региона Европейской части страны (ЕЧС) за 03.11.2017, полученный со спутника NOAA-16. Преобладающий матовый тон (яркость) снимка свидетельствует о наличии обширных зон слоистообразной подынверсионной облачности, а стало быть – присутствуют благоприятные условия для интенсивного накопления ЗВ в приземном слое воздуха.

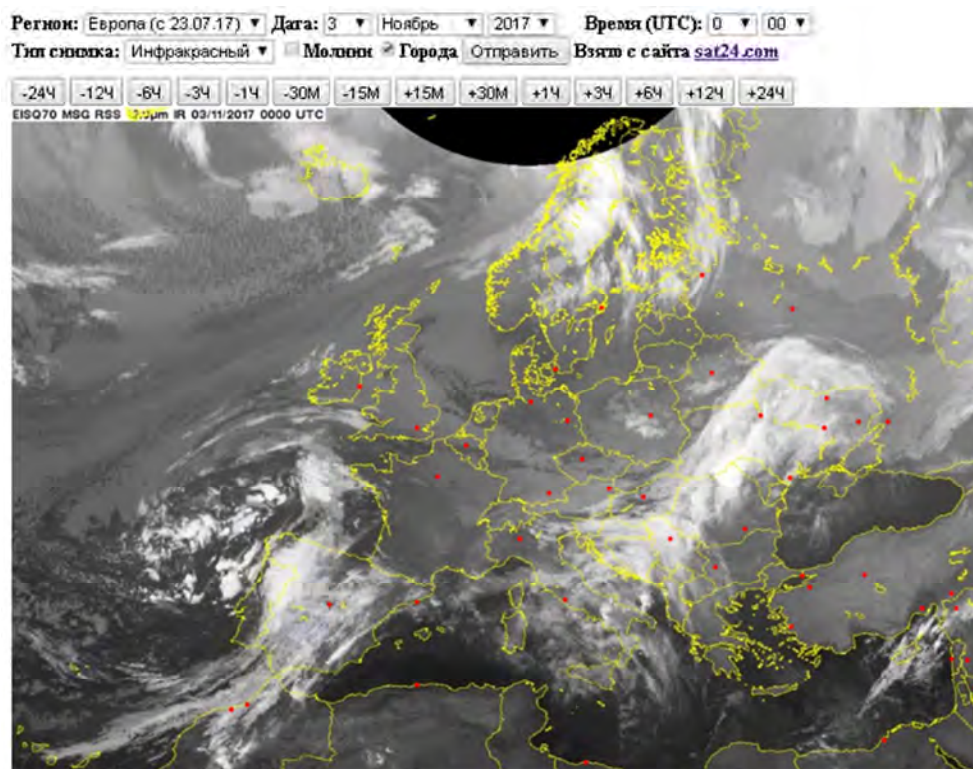


Рис. 4. Метеорологический спутниковый снимок Северо-Западного региона ЕЧС за 03.11.2017, полученный со спутника NOAA-16

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате статистической обработки материалов АСМ и анализа приземных наблюдений, аэрологических данных и спутниковой информации выявлено, что пики высоких значений загрязнения атмосферного воздуха чаще наблюдаются в зимний период в северо-восточных районах Санкт-Петербурга (Калининский район) при преобладании ветра юго-западного направления. Наиболее тяжелые ситуации, связанные с загрязнением атмосферного воздуха, складываются при затрудненной дорожно-транспортной обстановке (в дорожных пробках в часы пик) в периоды НМУ (в первую очередь при наблюдении в атмосфере задерживающих слоев – инверсий, изотермий).

Для минимизации последствий, связанных с высокими уровнями загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге и пригородах, представляется целесообразным использовать соответствующую информацию [3–7] для среднесрочного прогнозирования возникновения неблагоприятных метеорологических условий с целью их учета при планировании городских мероприятий по охране атмосферного воздуха.

Список используемых источников

1. ВОЗ публикует оценочные данные (с разбивкой по странам) по воздействию загрязнения воздуха на здоровье человека. – URL: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/air-pollution-estimates/ru/> (дата обращения: 12.03.2018).
2. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2016 году / под ред. И.А. Григорьева, И.А. Серебрицкого. – СПб.: ООО «Сезам-принт», 2017. – 158 с.
3. Экологический портал Санкт-Петербурга. – URL: <http://www.infoeco.ru/> (дата обращения: 12.03.2018).
4. Гидрометцентр России. – URL: <http://meteoinfo.ru/> (дата обращения: 12.03.2018).
5. «Gismeteo.ru» – прогноз погоды. – URL: <http://www.gismeteo.ru/> (дата обращения: 12.03.2018).
6. Метеоцентр: сообщения о погоде. – URL: <http://meteocenter.net/> (дата обращения: 12.03.2018).
7. Satellite weather Europe. –URL: <http://www.sat24.com/> (дата обращения: 12.03.2018).

М.Ю. Ильин*;
В.С. Ковалёв*;
М.А. Коняев**;

кандидат техн. наук, доцент

* АО «Лазерные системы», г. Санкт-Петербург

** БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ВЕТРА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АЭРОЛОГИЧЕСКОГО И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Приводятся результаты сравнения оценок профилей ветра, полученных при использовании разных методов: метода сравнения по значениям среднего ветра и по измерениям параметров ветра на каждой из высот. Продемонстрированы эксперименты, подтверждающие корректность обоих методов сравнения.

Ключевые слова: радиозонд, аэрозондирование, доплеровский ветровой лидар.

ВВЕДЕНИЕ

Радиозондирование – апробированный временем способ измерения метеопараметров. При радиозондировании профили скорости и направления ветра остаются единственными параметрами, измеряемыми непосредственно не аэрозондом, а дополнительными подсистемами, такими как специальная радиолокационная станция (РЛС) или приемники GPS данных [1]. В радиозондировании по угловым координатам и запаздыванию отправленного и полученного сигналов определяется положение шара в пространстве, а при дифференцировании пространственных параметров во времени вычисляется вектор горизонтальной скорости движения шара.

В последнее время в дополнение к радиозондированию атмосферы применяют ветровые дистанционные профилометры [2]. Несмотря на отсутствие возможности определять параметры ветра в атмосфере в любую погоду [3], такие системы находят свое применение в задачах [4], где скорость обновления информации становится важнее пропусков измерений параметров ветра на некоторых высотах. Особый интерес представляют задачи, в которых требуется максимальная информативность и оперативность измерений одновременно. Отсутствие проверенных методов качественного сравнения параметров профиля ветра, измеренного с помощью радиозондирования и дистанционного зондирования, является препятствием для одновременного использования этих систем. Поэтому важно выработать методологию сравнения и взаимного дополнения данных, получаемых разными способами.

Стоит отметить следующие принципиальные отличия в подходе к измерению профиля ветра в случае радиозондирования и дистанционного зондирования.

Масштаб измерений. В радиозондировании профиль скорости ветра вычисляется вдоль траектории полета шара и носит точечный характер в каждом слое. Лидар проводит измерения под фиксированным углом места при круговом сканировании в азимутальной плоскости. Чем выше слой, тем больше горизонтальная площадь осреднения значений скорости ветра.

Время измерений. В радиозондировании скорость ветра вычисляется последовательно в каждом из слоев. Лидар измеряет ее на всех доступных слоях одновременно. Исключение составляют слои атмосферы с низкой концентрацией рассеивающих частиц.

Способ измерений. В радиозондировании применяется дифференцирование координат зонда по времени. Лидар измеряет доплеровский сдвиг лазерного излучения, рассеянного от слоя атмосферы.

Интерпретация данных о ветре. В радиозондировании измеряются перемещения зонда в пространстве, который имеет восприимчивость к кинетической энергии воздушного потока (парусность) и строго не может соответствовать скорости воздушного потока. Лидар использует информацию о доплеровском сдвиге на рассеянном излучении от аэрозольных частиц (0,5–100 мкм), переносимых ветром.

Указанные отличия затрудняют сравнение данных.

МЕТОД СРАВНЕНИЯ ПО СРЕДНЕМУ ВЕТРУ

В случае, когда измерения профиля ветра дистанционным способом зондирования проводятся с шагом, не соответствующим шагу, применяемому в радиозондировании, оценки можно сравнивать методом определения среднего ветра. Он часто используется в баллистике, когда замена профиля ветра на результирующий вектор скорости ветра в определенном слое высотой h не влияет на конечный результат. Средний ветер позволяет, не прибегая к интерполированию точек между двумя измеренными значениями, вычислить такой ветер, который, будучи одинаковым на всех высотах, мог быть эквивалентным по силе и направлению действительному ветру, неодинаковому на различных высотах.

Для определения среднего ветра пользуются следующими формулами:

$$V_x = \frac{\sum_i^n (H_i - H_{i+1}) V_{x_{i+1}}}{H_n};$$

$$V_y = \frac{\sum_i^n (H_i - H_{i+1}) V_{y_{i+1}}}{H_n};$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2};$$

$$\theta_v = \arctg \frac{V_y}{V_x} \pm 180^\circ,$$

- где H_i – нижняя граница высоты i -го слоя;
 H_{i+1} – верхняя граница высоты i -го слоя;
 H_n – геометрическая высота всех слоев;
 $V_{x_{i+1}}$ – проекция скорости ветра в i -м слое вдоль направления север – юг;
 $V_{y_{i+1}}$ – проекция скорости ветра в i -м слое вдоль направления запад – восток;
 V_x – средняя скорость ветра вдоль направления север – юг;
 V_y – средняя скорость ветра вдоль направления запад – восток;
 V – средняя скорость;
 θ_v – среднее направление ветра.

Воспользовавшись данным методом, можно сравнить значения среднего ветра, вычисленные по оценкам, полученным радиозондом и с помощью дистанционного зондирования.

Для экспериментального сравнения профиля ветра были выбраны ясные дни в период с августа по октябрь 2016 года. Измерения проводились на территории метеорологической станции п. Воейково в Ленинградской области, синоптический индекс станции 26063. Сравнение скоростей ветра по данным зонда и импульсного ветрового лидара (ПЛВ-2000) проводились на высотах до 3 км. Характеристики ветрового лидара «ПЛВ-2000» и станции РЛС «МАРЛ» указаны в табл. 1.

Сравнивался средний ветер, вычисленный по данным с радиозонда, и три значения среднего ветра от данных ПЛВ-2000: за 10 мин до запуска зонда, во время запуска зонда и через 10 мин после запуска зонда.

Таблица 1

Технические характеристики ПЛВ-2000 и комплекса МАРЛ-А

Технические характеристики	ПЛВ-2000	МАРЛ
Диапазон определения направления ветра, град	0–360	0–360
Погрешность определения направления ветра, град	5	1,5
Диапазон определения скорости ветра, м/с	0–45	Нет ограничений
Погрешность определения скорости ветра, м/с	0,5	1
Пространственное разрешение, м	60	Не менее 30
Время измерения до высот 3 км, мин	0,3–5	10*

*При средней скорости подъема зонда, равной 5 м/с, время достижения шаром-зондом высоты в 3 км составляет 10 мин.

На рис. 1 изображены графики сравнения скоростей и направлений ветра в одном сеансе эксперимента.

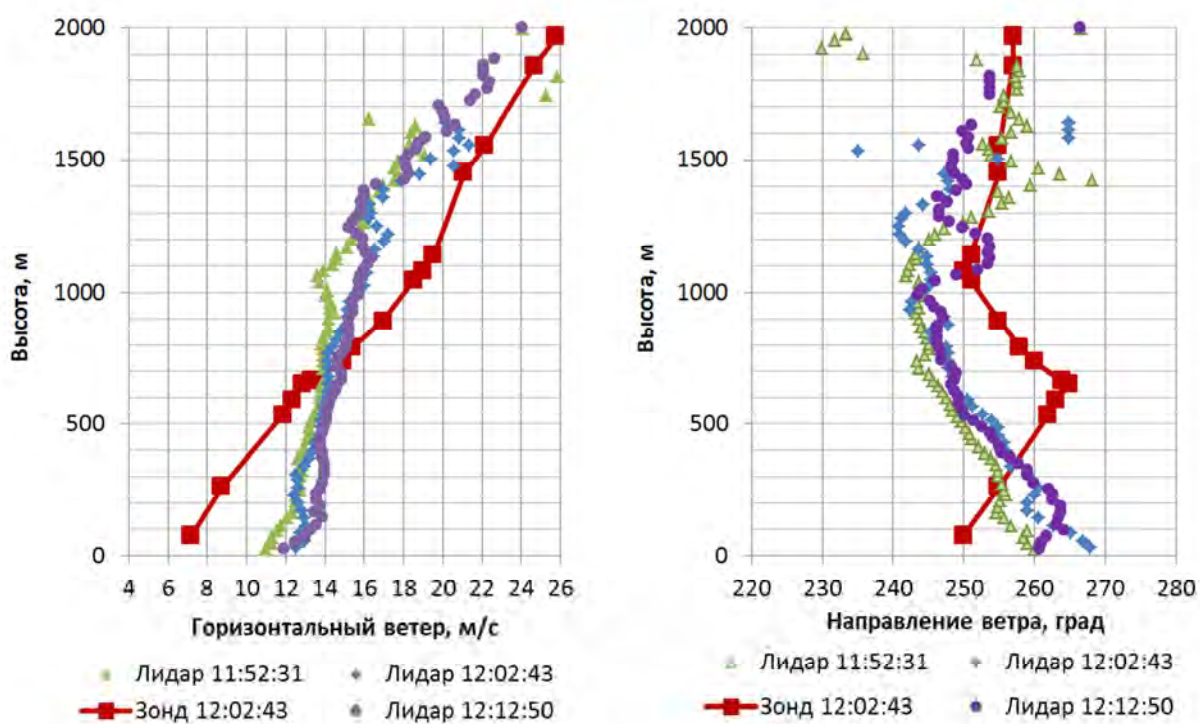


Рис. 1. Сравнение данных метеорологической станции «Воейково» и ПЛВ-2000 5 августа 2016 года

Существенных отличий в показаниях профиля ветра, измеренного с помощью дистанционного способа в разные промежутки времени, относительно данных зонда не наблюдалось.

На рис. 2 представлен график сравнения средних скорости ветра (слой 0–3км) за всё время эксперимента. Как видно, корреляция среднего ветра достаточно высокая, и ошибка определения среднего ветра меньше (за редким исключением), чем сумма заявленных погрешностей измерения.

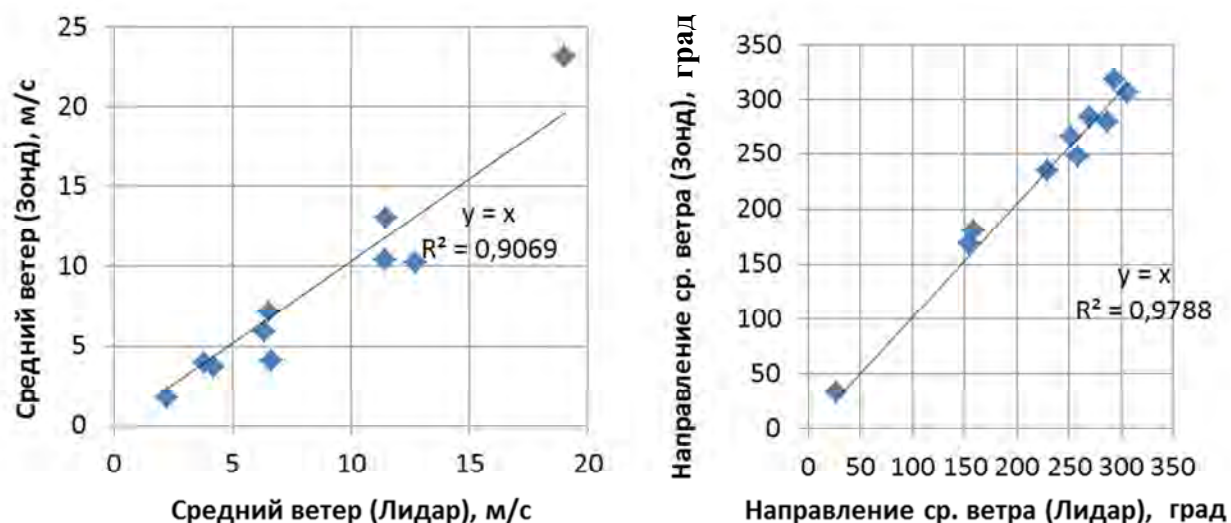


Рис. 2. Корреляция оценок скорости и направления среднего ветра за 10 сеансов эксперимента

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА В КАЖДОМ ВЫСОТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Вторым способом сравнения данных о профиле ветра является прямое сравнение параметров ветра, измеренного в каждом слое атмосферы. Данный подход легко использовать, когда шаги измерения профиля ветра в обоих случаях совпадают или отличаются друг от друга не более чем на половину их значения. Как и в первом методе, запуск зонда происходил в непосредственной близости к дистанционному ветровому профилометру. Измерения профиля ветра с помощью лидара начинались одновременно с пуском зонда и продолжались до того момента, пока зонд не достигнет высоты 3 км, после чего профиль ветра усреднялся за всё время измерения.

Для экспериментального сравнения результатов были выбраны ясные дни в июле 2017 года. Измерения проводились в Сеуле на трех разных ПЛВ-2000 в течение двух дней с частотой пусков зонда два раза в день. Сравнение скоростей ветра по данным зонда RSG-20A с приемной GPS станции GL-5000P и импульсного ветрового лидара (ПЛВ-2000) проводились на высотах до 3 км. Характеристики ветрового лидара ПЛВ-2000 и GPS станции RSG-20A указаны в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики ПЛВ-2000 и GL-5000P / RSG-20A

Технические характеристики	ПЛВ-2000	GL-5000P / RSG-20A
Диапазон определения направления ветра, град	0–360	0–360
Погрешность определения направления ветра, град	5	5
Диапазон определения скорости ветра, м/с	0–45	0–200
Погрешность определения скорости ветра, м/с	0,5	1
Пространственное разрешение, м	60	5
Время измерения до высот 3 км, мин	0,3–5	10
Обновление информации, с	20	1

На рис. 3 приведен пример сравнения оценок компоненты V_y , полученных лидаром и GPS зондом.

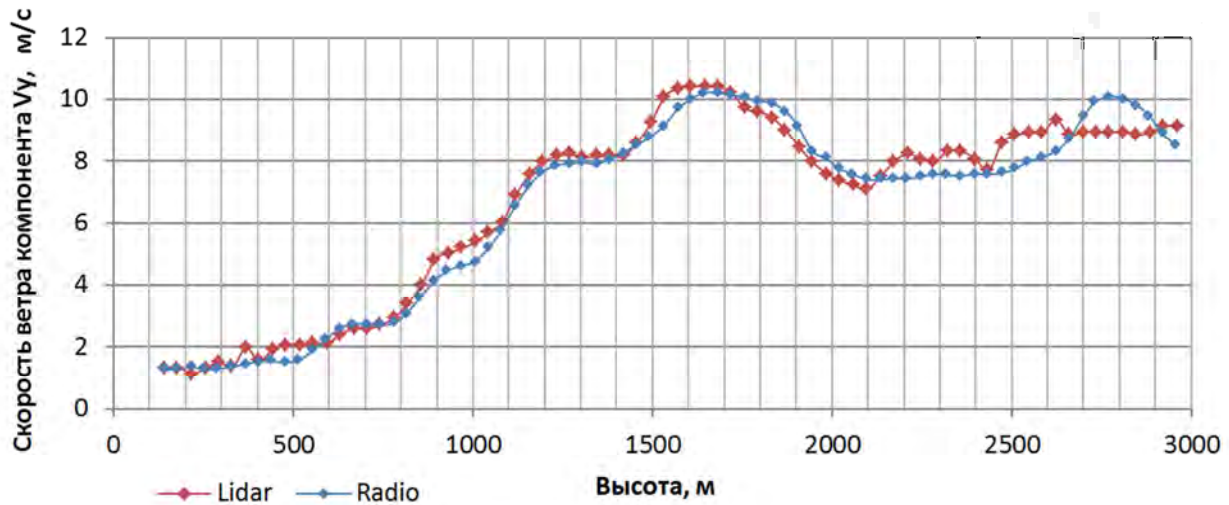


Рис. 3. Пример сравнения оценок профиля скорости (компонента V_y), полученных лидаром и GPS зондом

Вычисление корреляции проводилось методом Пирсона с оценкой ошибки коэффициента корреляции. По результатам более 800 независимых измерений по высотам на трех разных ПЛВ-2000 в течение 12 сеансов пуска GPS зонда корреляция показаний скорости ветра по компоненте V_x составила 0,91, а по компоненте V_y 0,97. Среднее значение коэффициента корреляции составило 0,95 с ошибкой коэффициента корреляции 1,15 %. Разброс значений скорости ветра по двум координатам не превышает 1 м/с. На рис. 4 продемонстрирована зависимость скорости ветра по двум компонентам лидара и GPS зонда.

Меньшая степень корреляции измерений для компоненты скорости V_x , по нашему мнению, связана с выбросами в измерениях GPS зонда по этой оси. Причиной этих выбросов являются ошибки в аппаратной части зонда. В случае фильтрации ошибочных данных степень корреляции приближается к компоненте V_y .

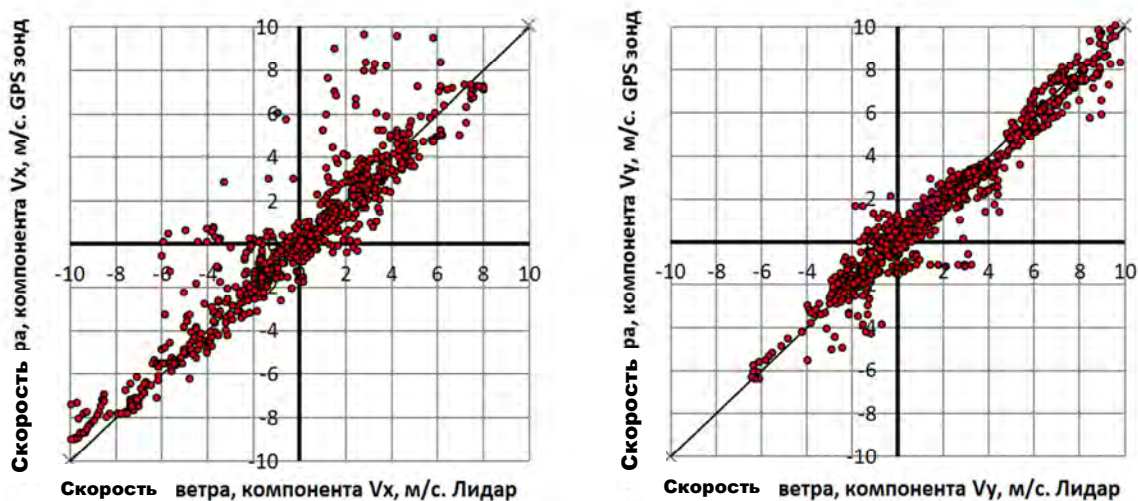


Рис. 4. Корреляция оценок скорости ветра, полученных лидаром и GPS зондом. Выборка из 800 измерений на разных высотах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод сравнения оценок профиля ветра, получаемых различными способами, по измерениям на каждой из высот, показывает лучшие результаты по сравнению с методом средней скорости ветра. Корреляция значений высока, а разброс оценок скорости ветра не превышает 1 м/с. Поэтому при равенстве шагов, с которыми проводятся измерения профиля ветра с помощью радиозондирования и дистанционным способом, предпочтение стоит отдавать методу сравнения значений профиля ветра поэлементно по каждому шагу. Сравнение по среднему значению скорости ветра также является достаточно точным, так как корреляция данных лежит в районе 0,9.

Список используемых источников

1. WMO intercomparison of high quality radiosonde systems / J. Nash, T. Oakley, H. Vömel, LI Wei // Instruments and observing methods report, Yangjiang. – 2010. – №107– 248 p.
2. Горелик А. Г. Радиолокационная метеорология и перспективы ее развития // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ РАН, 2009.
3. Лидарно-радиолокационный комплекс для определения профиля ветра в пограничном слое атмосферы / Г.Г. Шукин, А.С. Борейшо, В.Ю. Жуков и др. // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб., 2015. – С. 88–93.
4. Савин А.В., Коняев М.А. Допплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов // Метеоспектр. – 2008. – № 1. – С. 147–152.

Д.Е. Иннокентьев*;

В.И. Козлов*,

кандидат физико-математических наук;

Н.К. Кононова**,

кандидат географических наук;

Л.Д. Тарабукина*

* Институт космофизических исследований и аэронавтики СО РАН, г. Якутск

** Институт географии РАН, г. Москва

СОГЛАСОВАННЫЕ МЕЖГОДОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ В ДВУХ РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ АЗИИ И ЦИРКУЛЯЦИЯ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ В 2009–2016 ГОДАХ

На территории Северной Азии выделены области повышенной грозовой активности, которая проявляет вариации колебательного характера. Наблюдается отрицательная взаимосвязь интенсивности грозовой активности в этих регионах. Такую отрицательную связь предлагается объяснять особенностями атмосферной циркуляции на рассматриваемой территории.

Ключевые слова: грозовая активность, молния, Северная Азия, атмосферная циркуляция, атмосферное блокирование, гроза, детектор молний, WWLLN.

ВВЕДЕНИЕ

Информация о грозовых явлениях может быть полезна для решения проблем фундаментальной науки: метеорологии, физики атмосферы, изучения флуктуаций электромагнитного поля Земли. Также путем изучения грозовых явлений решаются задачи практической направленности: грозовая деятельность оказывает отрицательное влияние на многие сферы человеческой деятельности. Основным воздействующим на грозы фактором считается атмосферная циркуляция Северного полушария, перемещение атмосферных фронтов [1]. Однако атмосферная циркуляция меняется эпохами длительностью в десятки лет [2], таким образом, то, что было выявлено для одного периода, возможно, не учтет особенностей другого периода. Поэтому многолетние наблюдения остаются важным аспектом исследований климатологического описания грозовой активности. Мировая система грозолокации позволяет отслеживать вариации пространственного распределения числа грозовых разрядов в течение многих лет наблюдений. Общая климатология мировой грозовой активности в усреднении за год, произведенная по данным этой системы, представлена в работе [3].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ АППАРАТУРА И МЕТОДЫ

В 2009 году однопунктовая станция приема ОНЧ радиоизлучения в г. Якутске была включена в мировую сеть грозолокации (WWLLN). Приемный пункт представляет собой электрическую штыревую антенну высотой 4 м, подключенную через широкополосный предварительный усилитель (коэффициент усиления в рабочей полосе 5–100 кГц около 50) и АЦП к компьютеру [4]. Точное время определяется по секундным импульсам (PPS) GPS приемника. Работа системы основана на приеме радиосигналов от молний и атмосфериков и анализе разностей времени прихода волновых пакетов (TOGA) в ОНЧ-диапазоне частот (6–22 кГц) до, как минимум, пяти ближайших станций [3]. С 2009 по 2016 год количество радиоприемных пунктов WWLLN в пределах рассматриваемой нами территории Северной Азии (60–180 в.д., 40–80 с.ш.) возросло почти вдвое. Эффективность детектирования молний типов

«облако – земля» (ОЗ) и «облако – облако» (ОО) системы грозолокации по оценкам на 2012 год в среднем составляет около 11–15 %, и для молний с током более 40 кА – около 25 % [5]. Считается, что система регистрирует примерно равное соотношение как ОЗ молний, так и ОО молний. Для описания атмосферной циркуляции использована типизация циркуляции атмосферы Северного полушария, разработанная под руководством Б.Л. Дзердзеевского [6]. В типизации выделен 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ). На каждый ЭЦМ построена динамическая схема с обозначением путей циклонов и мест стационарирования антициклонов (www.atmospheric-circulation.ru). По Б.Л. Дзердзеевскому выделено четыре группы циркуляции: зональная, нарушение зональности, меридиональная северная, меридиональная южная, включающие 13 типов и 41 ЭЦМ.

АТМОСФЕРНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ В ДНИ С ИНТЕНСИВНЫМИ ГРОЗАМИ

На рассматриваемой в работе территории Северной Азии (60–180° в.д., 40–80° с.ш.) отмечается протяженный пояс высокой грозовой активности на широтах около 45–60° с.ш., сдвигающийся к югу в направлении на восток, подтверждаемый метеорологическими и спутниковыми наблюдениями [7]. Внутри него выделяются два региона со среднегодовой плотностью грозовых разрядов на квадратный километр, более 10 раз превышающей плотность на остальных территориях по данным WWLLN за 2009–2017 годы наблюдений [8]. Один из регионов находится примерно на территории с границами 45–60° с.ш. и 60–90° в.д., он приходится на Западносибирскую равнину и условно обозначен нами как «западный». Второй регион расположен в долине рек Сунгари и Амур с максимумом, наблюдающимся вдоль 127° в.д. в межгорно-котловинной областях между Малым Хинганом и Становым хребтом. Второй регион обозначен нами как «восточный».

В формировании восточного и западного регионов высокой грозовой активности участвуют разные атмосферные процессы: восточный формируется под влиянием летнего Дальневосточного муссона, а западный – в основном воздушными массами западного, юго-западного и северо-западного направления. Суммарное за летний сезон количество грозовых разрядов в этих регионах показывало согласованность вариаций в виде значительной отрицательной корреляции вариаций ежегодного инкремента (-0,94) [9].

Вариации суммарного за месяц количества грозовых разрядов, отнесенного к суммарному количеству разрядов за весь летний сезон (июнь – август), в период с 2009 по 2016 год показывают наличие колебаний с периодом в 2–3 года (рис. 1). В обоих регионах происходит смещение активности от начала к середине лета и затем обратно от сезона к сезону. Для каждого очага наблюдается наличие 1–3 периодов повышенной грозовой активности в течение лета. Перед такими максимумами часто отмечается понижение грозовой активности. Как было установлено в [10], интенсивные грозы западного очага наблюдаются при прохождении циклонов трех типов: а) продвигающиеся с юго-западного направления (ЭЦМ 7ал, 7бл, 8бл, начало лета); б) образующиеся на волне полярного фронта (ЭЦМ 6, июнь); в) проходящих с центральных районов европейской территории России (ЭЦМ 2а, 2б, 3, 4б, 13л, середина лета).

Летний сезон характеризуется доминированием меридиональных процессов в атмосфере в 2009–2016 годах, в основном северной и южной групп (2013 год, 2016 год). От сезона к сезону наблюдаются относительно короткопериодные вариации доминирования циркуляции меридионального северного и южного типов в течение лета. Так, в начале (июнь) и конце (августе) лета доминирование меридионального южного типа происходило только в 2013, 2014 и 2016 годах. В июле наблюдается преимущественно меридиональный северный тип циркуляции за исключением 2010 года. Зональный тип циркуляции чаще проявляет себя также в июле по сравнению с другими летними месяцами.

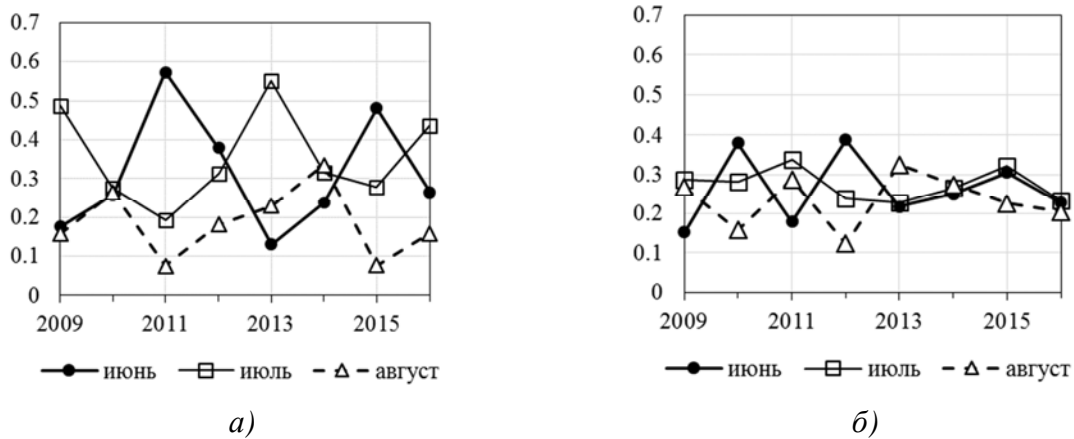


Рис. 1. Вариации доли за месяц количества грозовых разрядов из количества разрядов суммарного за летний сезон западного грозового очага (а) и восточного грозового очага (б)

Если сравнить вариации количества дней с ЭЦМ, объединенными в группы, за месяц (рис. 2) с аналогичными вариациями количества грозовых разрядов в двух регионах (рис. 1), значимая корреляция будет только для межгодовых вариаций значений в июле: западный очаг положительно коррелирует с меридиональной северной группой, когда чаще наблюдаются западные циклоны, и отрицательно с меридиональной южной, а восточный проявляет противоположную корреляцию в июле с рассмотренными группами (табл. 1). Для западного региона коэффициенты корреляции имеют противоположные знаки от месяца к месяцу. Грозная активность восточного региона более стабильно зависит от смены атмосферной циркуляции. Однако в целом корреляция слабая, то есть один и тот же ЭЦМ не может быть ассоциирован однозначно с наблюдаемым эффектом грозовой активности северной части Азии.

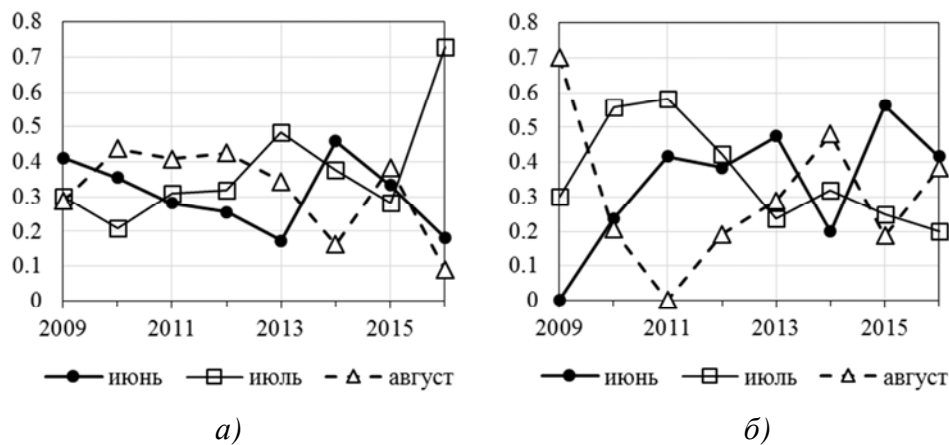


Рис. 2. Вариации частоты ЭЦМ группы меридиональной северной (а), меридиональной южной (б) в долях количества за месяц от суммарного за сезон

Таблица 1

Корреляционный коэффициент вариаций грозовой активности двух регионов и двух групп атмосферной циркуляции

Месяц	Запад./Мер. сев.	Запад./Мер. юж.	Вост./Мер. сев.	Вост./Мер. юж.
Июнь	-0,03	0,49	-0,01	0,25
Июль	0,53	-0,72	-0,6	0,47
Август	-0,29	0,38	-0,24	0,21

Были рассмотрены отдельно сезонные вариации количества грозовых разрядов двух ранее выделенных масштабных регионов повышенной грозовой активности и ЭЦМ, соответствующие дням с локальными пиками вариаций и днями пониженной активности. Каждый год дни повышенной грозовой активности выбирались по уровню $\sim 0,7$ от максимума за лето, а дни пониженной грозовой активности – по уровню 0,1 от летнего максимума. В период с 2009 по 2016 год для западного региона выделены 27 дней повышенной грозовой активности (от 2 до 6 дней в каждом сезоне). Наиболее характерными ЭЦМ для высокой грозовой активности западного региона оказались ЭЦМ 9а и 13л (7 и 9 случаев соответственно). Остальные пики приходились на ЭЦМ 12а и 12бл (по 2 дня), 2а, 2б, 3, 4а, 6, 10а, 10б (по 1 дню за весь период). При этом в эти дни высокой грозовой активности отмечается доминирование именно западного очага по количеству грозовых разрядов, этому соответствуют 26 дней. Для восточного региона за весь рассматриваемый период выделены 40 дней максимальной грозовой активности (от 2 до 10 дней на каждый сезон, чаще – по 4 пика за сезон), из них 12 дней приходится на ЭЦМ 13л, 8 дней – на ЭЦМ 9а, 6 дней – на ЭЦМ 12а, 5 дней – на ЭЦМ 8а, менее – ЭЦМ 3, 12бл (по 3 дня), 9б, 8гл, 7ал (по 1 дню). В дни высокой активности восточного региона наблюдалось в основном доминирование активности восточного региона по сравнению с западным регионом – 38 дней, когда отношение суточного количества грозовых разрядов в восточном регионе к количеству грозовых разрядов в западном было более 1, из них 30 дней это отношение показывало значение более 2. Таким образом, в дни максимальной грозовой активности очагов активность одного из них существенно ниже.

ЭЦМ 8а, 8вл, 12а и 12бл, при которых суточное количество грозовых разрядов в восточном регионе превышало количество грозовых разрядов в западном регионе, как минимум, в 2 раза (при этом повторялось такое событие в 2 раза чаще, чем превышение количества в западном регионе для выбранного ЭЦМ), относятся к меридиональной северной группе циркуляции. В дни с такими ЭЦМ над Западной Сибирью наблюдается область высокого давления, а над Дальним Востоком – низкого давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что атмосферная циркуляция Северного полушария, представляющая комплексную динамическую схему локализации барических образований, сильно влияет на грозовую активность двух регионов повышенной грозовой активности, расположенных на Западно-Сибирской равнине и в долине рек Амур и Сунгари. Как установлено в [11], развитие атмосферного блокирования над Западной Сибирью происходит с вовлечением воздушных масс летнего муссона над Дальним Востоком, что и отображается в вариациях соотношения количества грозовых разрядов двух массивных грозовых очагов. Чаще всего в обоих регионах грозы происходили при ЭЦМ 9а и 13л, однако в дни максимальной грозовой деятельности очагов активность одного из них была существенно ниже. ЭЦМ 8а, 8вл, 12а и 12бл чаще способствуют активному развитию гроз в Дальневосточной области, чем в Западной Сибири.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00215 мол_а.

Список используемых источников

1. Хуторянская Д.Ф. Сопряженность грозовых и циркуляционных процессов в Сибирском секторе // Материалы метеорологических исследований. – 1982. – № 6. – С. 60–77.
2. Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX-XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 133–162.

3. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology / Virts K.S. et al // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2013. – Vol. 94, № 9. – P. 1381–1391.
4. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Каримов Р.Р. Пространственное распределение плотности грозных разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2011. – Т. 8, № 3. – С. 257–262.
5. Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarneau T.J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // *J. Geophys. Res.* – 2010. – Vol. 115. – P. D18206.
6. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзержевскому. – М.: Воентехиниздат, 2009. – 372 с.
7. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector / H.J. Christian, R.J. Blakeslee, D.J. Boccippio, W.L. Boeck // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108, №. D1. – P. ACL 4-1 – ACL 4–15.
8. Пространственное распределение грозных разрядов в Северной Азии / Л.Д. Тарабукина, В.И. Козлов, Р.Р. Каримов, В.А. Муллаяров // *Метеорология и гидрология*. – 2017. – № 2. – С. 20–29.
9. Тарабукина Л.Д., Козлов В.И. Пространственно-временное распределение грозных разрядов по территории северного региона Азии и его сравнение с солнечной активностью в 2009–2016 годах // *Солнечно-земная физика*. – 2017. – Т. 3, № 2. – С. 70–74.
10. Горбатенко В.П. Влияние географических факторов климата и синоптических процессов на грозную активность: авторефер. дис. д-ра геогр. наук. – Томск: Томск. политех. ун-т, 2003. – 40 с.
11. Peculiarities of the atmospheric blocking events over the Siberia and Russian Far East region during summertime / O.Y. Antokhina, P.N. Antokhin, E.V. Devjatova, V.I. Mordinov // *Proc. SPIE 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – 2017. – Vol. 10466. – P. 104665V.

Н.П. Красненко* **,

доктор физико-математических наук, профессор;

Л.Г. Шаманаева*** ****,

кандидат физико-математических наук, доцент;

* Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

** Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

*** Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

**** Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

СОДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ НИЖНЕГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Рассматривается методология содарного зондирования и результаты исследования пространственно-временной динамики термической структуры, трех компонентов скорости ветра и характеристик турбулентности в атмосферном пограничном слое. Реализован алгоритм обработки содарных данных, позволяющий одновременно визуализировать динамику вектора скорости ветра, восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик полей температуры и скорости ветра и др. Приведены результаты исследований статистических закономерностей и структуры как температурной, так и ветровой турбулентности, что очень важно для практических приложений.

Ключевые слова: содар, зондирование, скорость ветра, турбулентность, атмосфера.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования структуры и динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Скорость ветра является наиболее изменчивым метеорологическим параметром атмосферы. Знание характеристик атмосферной турбулентности также имеет фундаментальное и прикладное значение. Оперативные данные о профилях скорости ветра нужны для уточнения прогноза состояния воздушного бассейна различных районов, метеорологического обеспечения работы аэропортов и др. Если в приземном слое атмосферы измерения профилей ветра достаточно хорошо отработаны, прежде всего с помощью невысоких метеомачт с расположенными на них датчиками, и существуют модели поведения ветра, то в пограничном слое всё сложнее. Для приземного слоя разработана теория подобия Монина – Обухова, по которой профили скорости ветра, как и других метеорологических величин, определяются через универсальные функции, зависящие от типа стратификации атмосферы, шероховатости подстилающей поверхности. Профиль ветра в АПС зависит еще и от скорости геострофического ветра (условий в свободной атмосфере). Построение общей теории АПС, аналогичной вышеупомянутой для приземного слоя, довольно затруднительно из-за многофакторности зависимостей.

Для измерения характеристик турбулентности в АПС в основном используются средства лазерного (лидары) и акустического (содары) зондирования. Применение содаров позволяет получать длинные временные ряды наблюдений вертикальных профилей характеристик температурной стратификации и вектора скорости, обеспечивать высокое пространственное и временное разрешение и, следовательно, фиксировать тонкую структуру АПС, а также рассчитывать структурные функции поля скорости ветра и другие характеристики турбулентности.

В докладе по результатам работ авторов [1–11] анализируется пространственно-временная динамика характеристик атмосферной турбулентности, включая три компонента скорости ветра, продольные и поперечные структурные функции поля скорости ветра, структурные характеристики температуры и скорости ветра, скорость диссипации кинетической энергии турбулентности и внешние масштабы температурной и динамической турбулентности, рас-

считанные из временных рядов содарных измерений с использованием замкнутого итерационного алгоритма обработки данных с учетом турбулентного ослабления звука по трассе распространения до зондируемого объема и обратно, позволяющего одновременно восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик полей температуры и скорости ветра и исследовать их взаимосвязь.

АППАРАТУРА ЗОНДИРОВАНИЯ

Измерения проводились трехкомпонентным моностатическим доплеровским содаром с рабочей частотой 1700 Гц, периодом посылки импульсов 11,5 с, длительностью импульса 150 мс [10, 11]. Одна приемная антенна содара была ориентирована вертикально, а две другие наклонены под углом 20° к вертикали в ортогональных плоскостях. Нормированная мощность сигнала обратного рассеяния измерялась с высотным разрешением $\Delta z = 20$ м, минимальная высота зондирования варьировалась от 48 до 74 м в зависимости от шумовой обстановки в период измерения. Дополнительно контролировалось отношение сигнал/шум по факсимильной записи сигнала. Обрабатывались серии из $N = 53$ измерений, что обеспечивало 10-минутный период усреднения. Аппаратурные константы содара были определены путем калибровки содара по результатам измерений ультразвуковым термометром/анемометром.

Обрабатывались также результаты измерений доплеровского минисодара с рабочей частотой 4900 Гц, длительностью импульса излучения $\tau = 60$ мс, периодом посылки зондирующих импульсов 4 с [12]. Излучение также последовательно посылалось и принималось в трех направлениях – вертикальном и наклонных, под углами $\alpha = 14^\circ$ к вертикали в двух взаимно ортогональных плоскостях. Высотные профили трех компонентов скорости ветра $V_{i,j}(z_k)$, $i = x, y, z$, $j = 1, \dots, N$ измерялись в $M = 40$ строках z_k шириной $\Delta z = 5$ м в диапазоне высот 5–200 м. Серии из $N = 150$ профилей обеспечивали получение структурных функций скорости ветра с 10-минутным усреднением.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве примера на рис. 1, а, б в векторном представлении показана полусуточная пространственно-временная динамика горизонтальной скорости ветра по результатам измерений в течение двух дней, 14 и 16 сентября. Из рис. 1, а видно, что в 11 ч местного времени вертикальное распределение скорости ветра было достаточно однородным, северо-восточным, и сохранялось во всем диапазоне высот зондирования. При этом горизонтальная компонента скорости ветра V_h вначале росла с высотой, и ее максимальное значение V_h фиксировалось на высоте 75 м. Затем она плавно уменьшалась с высотой z . Это характерно для устойчивой стратификации (при наличии температурной инверсии). У верхней границы инверсии профиль ветра имеет струеобразный характер. Температурная инверсия поднимается и далее распадается. Стратификация переходит в неустойчивую, а в послеобеденное время – в нейтральную. В 12 ч местного времени, достаточно равномерное распределение V_h сохранялось до высоты $z = 175$ м, скорость ветра также росла с высотой. В 13 ч местного времени северо-восточное направление V_h сменилось на юго-западное, и оно сохранялось практически до 17 ч. В 18 ч, направление горизонтального ветра поменялось на северо-западное, но высота верхней границы струи в приземном слое со временем уменьшалась и составила 75 м в 23 ч. Следует отметить, что к ночи опять образуется устойчивая стратификация атмосферы и наблюдаются сильные струйные течения ветра на высотах 100 и 160 м.

16 сентября ветер был более сильным, особенно в нижнем 100-метровом слое. Здесь прослеживается увеличение высоты максимума V_h с 45 м в 10 ч местного времени до 100 м в 14 ч. Это тоже связано с подъемом ночной приземной температурной инверсии. В профиле скорости ветра отчетливо наблюдается наличие такого опасного для авиации явления, как сдвиг ветра. В 18 ч юго-западное направление струйного течения сменилось на северо-западное, высота струи вначале выросла со 100 м в 20 ч до 125 м в 21 ч, а затем уменьшилась до 75 м в 22 ч. К 23 ч направление ветра сменилось на юго-восточное, и он стал менее сильным. Нерегулярное поведение скорости ветра в нижнем 25-метровом слое можно объяснить влиянием шероховатости подстилающей поверхности и ее неравномерным прогревом.

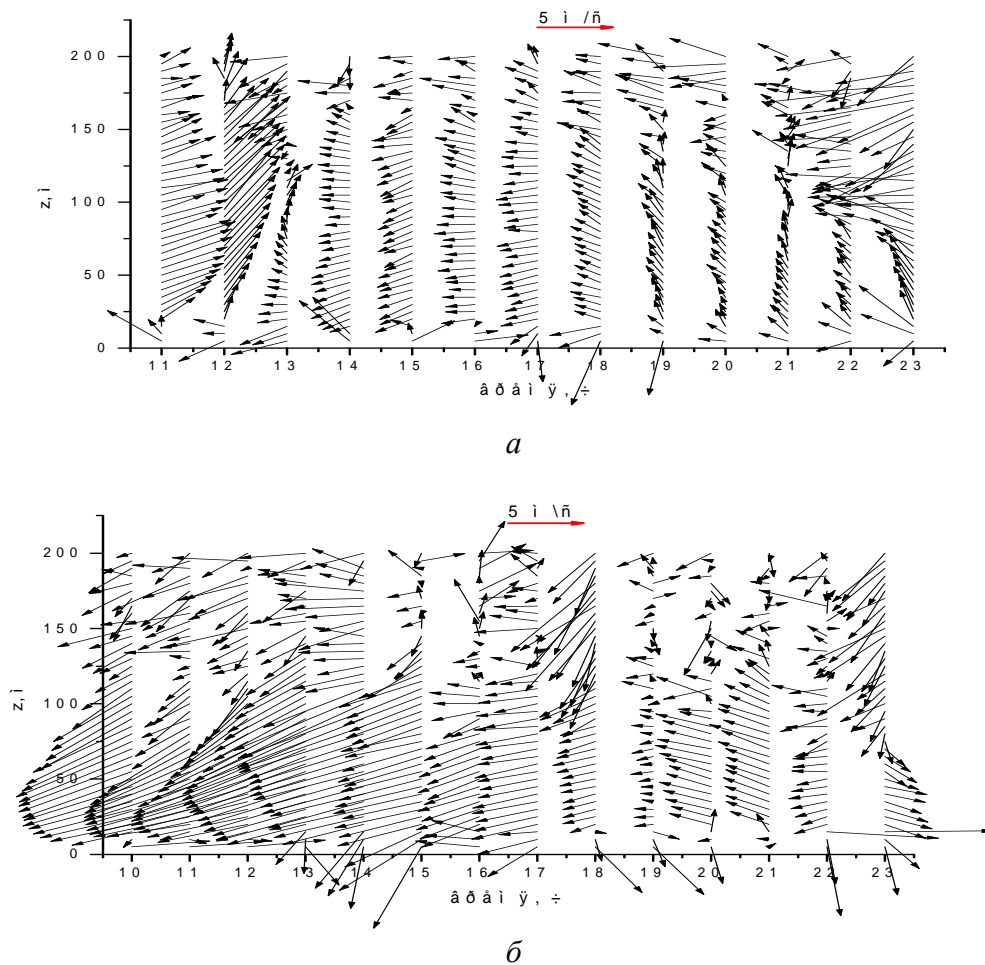


Рис. 1. Почасовая полусуточная пространственно-временная динамика горизонтальной скорости ветра по результатам минисодарных измерений 14 и 16 сентября. Ориентация: вверх – север, слева – запад

Таким образом, проведенные минисодаром измерения профилей скорости ветра показали на его большую эффективность в контроле тонкой структуры АПС, выявлении струйных течений и обнаружении сдвига ветра. Анализ результатов измерений высотных профилей вектора скорости ветра и его вертикального и горизонтального компонентов показал, что аналитические аппроксимации вертикального профиля горизонтальной скорости ветра возможны для нейтральной и неустойчивой стратификаций атмосферы. Довольно хорошо они описываются логарифмическим законом, что отмечалось и раньше при обработке данных измерений скорости ветра на высотных метеомачтах. При устойчивой стратификации атмосферы, и особенно при наличии приподнятых температурных инверсий, такую аппроксимацию сделать проблематично без знания других дополнительных характеристик АПС, в этом случае необходимо проводить реальные измерения. Векторное представление дает возможность ви-

зуализации пространственно-временной динамики поля ветра в АПС, в частности, позволяет оценить форму, размеры струйных течений и сдвига ветра в них.

Рис. 2, а–е иллюстрирует синхронную временную динамику температурной (факсимильная запись сигнала показана на рис. 2, а, г) и ветровой турбулентности [на рис. 2, б, д – поперечная (D_{\perp}) и на рис. 2, в, е продольная (D_{\parallel}) структурные функции скорости ветра] в нижнем 200-метровом слое атмосферы в градациях искусственного цвета для двух 10-минутных серий измерений минисодаром. На факсимильных записях отчетливо видна перьевая структура, характерная для условий дневной конвекции, верхняя граница которой подвержена квазипериодическим колебаниям и имеет выраженную тенденцию к увеличению высоты за период наблюдения. Величины поперечной (рис. 2, б, д) и продольной (рис. 2, в, е) структурных функций, в $\text{м}^2/\text{с}^2$, в градациях искусственного цвета указаны справа от рисунков.

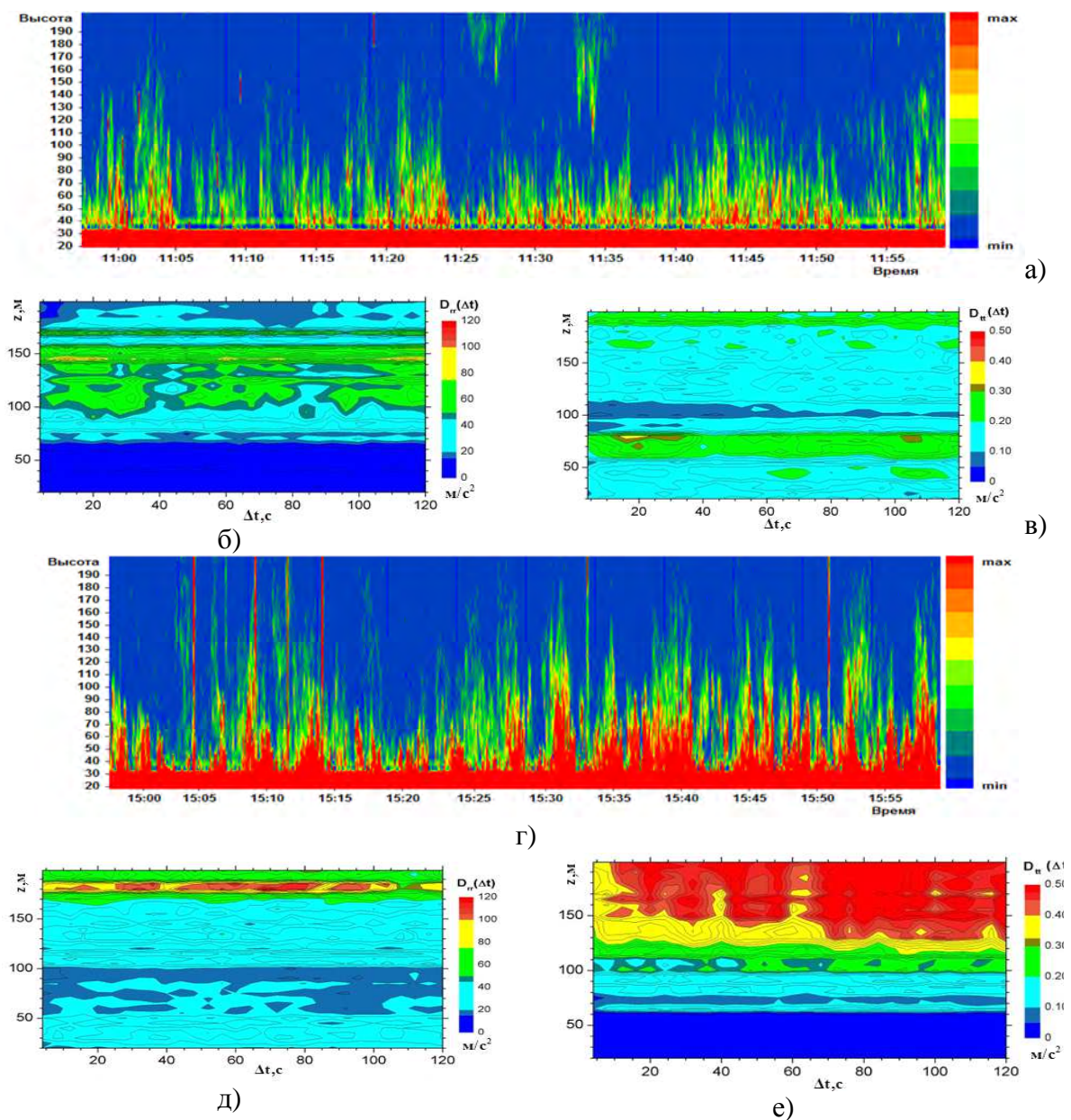


Рис. 2. Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности утром в 11:00 (а–в) и днем в 15:00 (г–е)

Видно, что поперечная структурная функция много меньше продольной, это указывает на сильную анизотропию атмосферных флуктуаций в продольном и поперечном направлении и при сдвливании мелкомасштабной турбулентности в вертикальном направлении. Поведение продольной структурной функции также характеризует динамику высоты слоя перемешивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений показали, что аппроксимации вертикального профиля горизонтальной скорости ветра возможны для нейтральной и неустойчивой стратификаций атмосферы. Довольно хорошо они описываются логарифмически-степенной зависимостью. Найдены константы аппроксимации и оценены их погрешности. Векторное представление позволяет визуализировать пространственно-временную динамику поля ветра и характеристик турбулентности в АПС, в частности, оценить форму и размеры струйных течений и сдвига ветра в них. Приведены результаты исследований дисперсии трех компонентов скорости ветра. Получены результаты измерений пространственно-временной динамики продольных и поперечных структурных функций поля скорости ветра, структурных характеристик полей температуры и скорости ветра, скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, и внешних масштабов температурной и динамической турбулентности.

Список используемых источников

1. Влияние времени усреднения на качество восстановления характеристик мелкомасштабной ветровой турбулентности при акустическом зондировании / О.Ф. Капегешева, Н.П. Красненко, П.Г. Стафеев, Л.Г. Шаманаева // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 10. – С. 28–31.
2. Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности в нижних слоях атмосферы по результатам акустического зондирования / О.Ф. Капегешева, Н.П. Красненко, П.Г. Стафеев, Л.Г. Шаманаева // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9/2. – С. 228–232.
3. *Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Пространственно-временная динамика скорости диссипации кинетической энергии турбулентности в нижней атмосфере // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 12. – С. 101–106.
4. Внешние масштабы температурной и динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы / Н.П. Красненко, О.Ф. Капегешева, П.Г. Стафеев, Л.Г. Шаманаева // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6. – С. 57–62.
5. Оценка внешнего масштаба динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы / О.Ф. Капегешева, Н.П. Красненко, П.Г. Стафеев, Л.Г. Шаманаева // Известия вузов. Физика. – 2013. – № 9/2. – С. 254–255.
6. Внешний масштаб динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы / О.Ф. Капегешева, Н.П. Красненко, П.Г. Стафеев, Л.Г. Шаманаева // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 11. – С. 964–968.
7. *Красненко Н.П., Тарасенков М.В., Шаманаева Л.Г.* Пространственно-временная динамика скорости ветра по результатам минисодарных измерений // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 77–83.
8. Пространственно-временная динамика дисперсии скорости ветра по результатам измерений минисодаром / Н.П. Красненко, О.Ф. Капегешева, М.В. Тарасенков, Л.Г. Шаманаева // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8. – С. 65–69.

9. Симахин В.А., Черепанов О.С., Шаманаева Л.Г. Пространственно-временная динамика скорости ветра по результатам минисодарных измерений // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 176–181.

10. Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G. Sodar measurements of the structural characteristics of temperature fluctuations and the outer scale of turbulence // Meteorol. Z. – 1998. – Vol. 7. – P. 392–397.

11. Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G. Sodar derived vertical profiles of the structure characteristics of temperature fluctuations and the outer scale of turbulence // Proc. 9th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans, Vienna. – 1998. – P. 223–226.

12. Atmospheric Systems Corp. – URL: <http://www.minisodar.com/products/4000i/> (дата обращения: 01.04.2018).

В.М. Краснов*,
 доктор физико-математических наук;
 Ю.В. Кулешов*,
 доктор техн. наук, профессор
 *ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

ВЫБОР НАЧАЛЬНОЙ ФОРМЫ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

На основе эксперимента и расчетов показано, что для углов выхода акустических лучей от точечного источника, по крайней мере больших 23° , предпочтительно использовать в качестве начальной формы модифицированный импульс Рида, а при меньших углах – импульс Рида.

Ключевые слова: атмосфера, инфразвук, модель распространения, формы импульса.

При интерпретации данных инфразвукового мониторинга атмосферы или условий распространения акустических волн от точечного источника необходимо задать форму начального акустического импульса. Экспериментальному определению формы начального импульса посвящено много работ. Например, в работе [1] обобщаются результаты наблюдений, проведенных во время наземного химического взрыва Misty Picture, выполненного в США в 1987 году. Эквивалентная мощность заряда составила 3840 т тринитротолуола (ТНТ) и обеспечила амплитуду ударной волны как при ядерном взрыве мощностью 8 кт ТНТ. Датчики инфразвука располагались на расстоянии от 7 до 1200 км, при этом 21 датчик зарегистрировал волну в зоне видимости. Рассматривалось согласие экспериментальной формы акустической волны и модельных: классической формы, использованной Kinney и Graham [2]; импульса Рида (Reed) [3] и предложенной Дробжевой, Красновым [4] модификации импульса Рида. Получено, что амплитуда, центральная частота спектра и привязка по времени сигнала наилучшим образом согласуются с моделью Рида. При этом отмечается, что модифицированный импульс Рида улучшает форму импульса, но не спектр. Целью настоящей работы является определение возможной причины отличия от эксперимента модифицированного импульса Рида.

Импульс Рида описывается выражением

$$P'(t) = \Delta p_u (1 - t/t_u) (1 - t/\tau_g) \left(1 - (t/\tau_g)^2\right), \quad (1)$$

где $P'(t)$ – возмущение давления;

Δp_u – амплитуда фазы сжатия;

t_u – длительность фазы сжатия;

τ_g – общая длительность импульса;

t – время;

u – индекс, который относится к величинам для однородной атмосферы.

Необходимо отметить, что недостатком модели Рида является то, что площадь фазы сжатия акустического импульса меньше площади фазы разрежения, а это противоречит закону сохранения количества движения при распространении акустического импульса в свободном пространстве. Именно этот недостаток послужил главной причиной корректировки модели Рида авторами работы [4]. В результате была предложена следующая модель формы импульса:

$$\begin{cases} P'(t) = \Delta p_u (1 - t/t_u)(1 - t/\tau_g)(1 - (t/\tau_g)^2) & \rightarrow 0 \leq t \leq 0,4\tau_g, \\ P'(t) = kt + d & \rightarrow 0,4\tau_g \leq t \leq \tau_s, \\ P'(t) = 0 & \rightarrow t > \tau_s, \end{cases} \quad (2)$$

где τ_s – время, для которого площадь волны разрежения становится равной площади волны сжатия;

$$d = P'(0,4\tau_g) - 0,4k\tau_g;$$

$$k = \frac{dP'}{dt} \text{ при } t = 0,4\tau_g.$$

На рис. 1 показана форма импульса Рида и его модификация [формула (2)] для взрыва Mill Race мощностью 500 т ТНТ. Форма импульса сжатия не изменилась, различие наблюдается только в форме импульса разрежения.

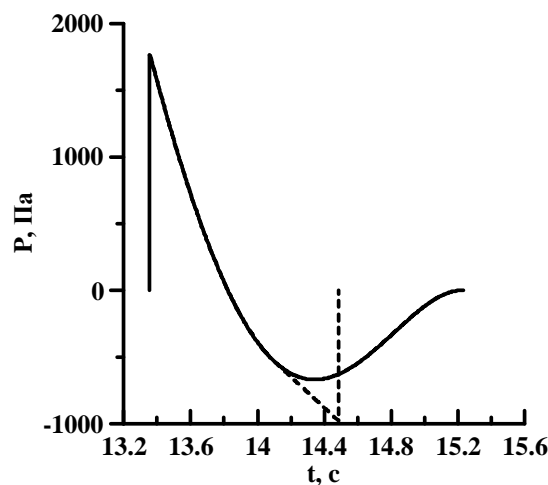


Рис. 1. Сопоставление форм:
импульса Рида (сплошная линия)
и модифицированного (штриховая линия)

Очевидно, что в случае выхода (прихода в точку приема) акустического луча под малыми углами к горизонту земная поверхность будет оказывать влияние на поле акустической волны и, соответственно, на форму импульса. Возможно, по этой причине форма импульса Рида лучше согласуется с экспериментом, когда акустические волны распространяются вдоль поверхности Земли. Рассмотрим правомерность этого предположения на примере эксперимента Mill Race [5], когда при точечном химическом взрыве акустические волны регистрировались с помощью датчиков, установленных на четырех парашютах, что обеспечивало прием «сигналов» при разных углах выхода акустических лучей. В частности, высоты расположения парашютов (h) составляли: 9,0, 8,8, 8,6 и 8,2 км при горизонтальных расстояниях от места взрыва (r), соответственно: 16,3, 10,6, 5,2 и 1,9 км. Для определения возмущения давления на фронте ударной волны сосредоточенного заряда использовалась эмпирическая формула для сферического взрыва тротила в свободном пространстве [6]:

$$\frac{\Delta p_u}{P_0} = \frac{0,21}{R_2} + \frac{0,21}{R_2^2} + \frac{0,15}{R_2^3}. \quad (3)$$

Здесь P_0 – атмосферное давление на поверхности Земли;

R_2 – безразмерная величина, $R_2 = r/\Lambda$, где r – расстояние от центра взрыва; Λ – ха-

рактёрный масштаб взрыва, $\Lambda = (E / P_0)^{1/3}$ [E – энергия, выделенная при взрыве 1 кт заряда ТНТ, $E = 4.15 \cdot 10^{12}$ Дж].

Геометрическая форма акустического волнового фронта от точечного наземного взрыва является расширяющейся полусферой. В результате плотность энергии становится в два раза больше, чем при сферическом фронте. Поэтому при расчетах в предположении идеальной отражающей поверхности была принята величина E в два раза большей.

Коробейников [6] установил, что ударная волна вырождается в инфразвуковую, и ее скорость становится равной скорости звука при $R_2 = 12,04$. Время распространения ударной волны от центра взрыва до R_2 определяется по формуле

$$t_0 = 9,526 \Lambda \sqrt{\rho_0 / P_0}, \quad (4)$$

где ρ_0 – фоновая плотность на высоте взрыва.

Для расчета начального количества движения фазы сжатия использовалась формула Майлса [7]:

$$S_u = 3,691 \cdot 10^{-3} P_0 \Lambda / c, \quad (5)$$

где c – скорость звука.

Длительность фазы сжатия акустического импульса рассчитывалась на основе формул (2) и (5).

Формулы (1) и (2) справедливы для случая однородной атмосферы. В случае взрывов большой мощности начальный радиус фронта акустической волны $r_f = \Lambda R_2$ может составлять величины в несколько километров. В результате при различных углах выхода акустических лучей их начальные «точки» на фронте оказываются на разных высотах с разными значениями параметров фоновой атмосферы. Коррекция величин давления Δp_u и длительности t_u на начальном фронте акустической волны при переходе от однородной к неоднородной атмосфере проводилась на основе закона сохранения количества движения для неоднородной атмосферы [8]:

$$\Delta p_f = \Delta p_u \left(\frac{\rho_{0f}}{\rho_{0u}} \right)^{1/2} \frac{c_f}{c_u}, \quad t_f = t_u (c_u / c_f), \quad (6)$$

где индекс f используется для обозначения параметров акустического импульса и атмосферы на начальном фронте волны для различных высот выхода акустического луча.

Высотные профили фоновой атмосферы: плотность, скорость звука, температура, коэффициент поглощения, удельные теплоемкости при постоянном объеме и давлении и другие рассчитывались на основе модели нейтральной атмосферы MSIS-90 [9]. Эволюция акустического импульса Рида и его модифицированной формы при их распространении от начального фронта акустической волны до датчиков на парашютах рассчитывалась с учетом неоднородности атмосферы, нелинейных эффектов, поглощения и расходимости волнового фронта по модели, описанной в [8]. Результаты расчетов акустических импульсов для точек расположения четырех парашютов с датчиками давления и их сопоставление с экспериментом представлены на рис. 2, где Δ – расчетный угол выхода акустического луча из места взрыва.

Видно, что расчетные величины амплитуды, длительности и времени прихода согласуются с экспериментальными в пределах нескольких процентов. Фазы сжатия для обоих типов использованных начальных импульсов практически совпадают. Однако при использовании импульса Рида наблюдается различие между модельной и экспериментальной формой фазы разрежения, причем с увеличением угла выхода акустического луча различие возрастает. То есть чем ближе к вертикали направление распространения волны, тем больше различие для импульса Рида, и, наоборот, чем ближе к поверхности земли распространяется волна, тем различие меньше.

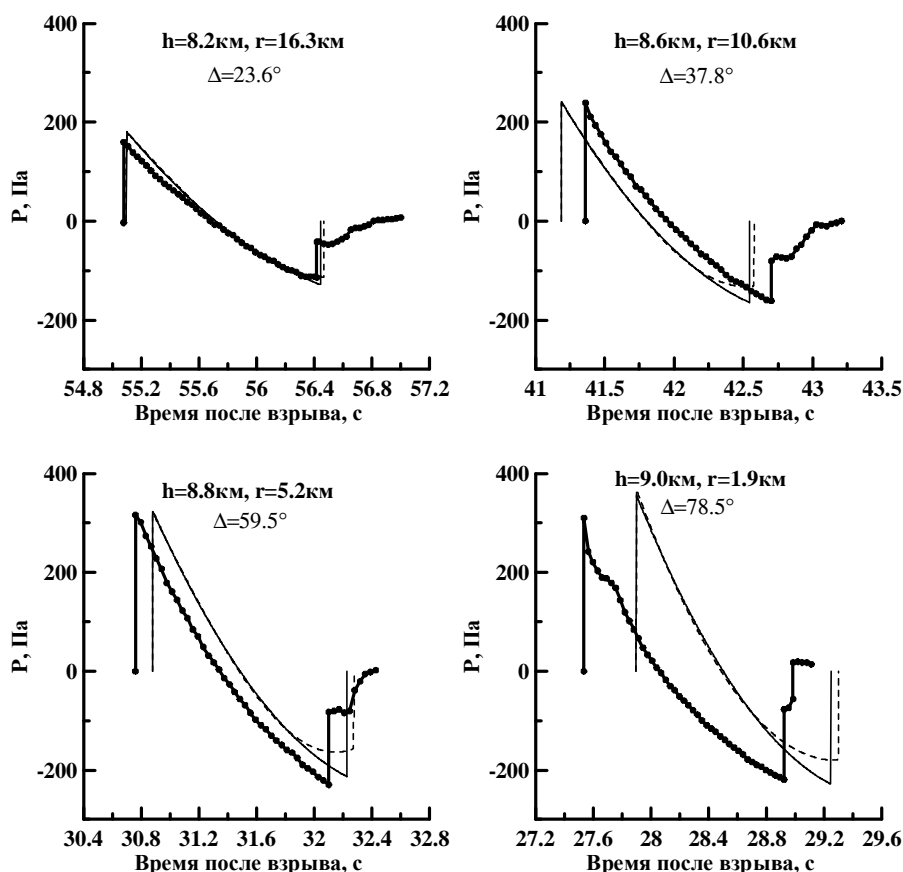


Рис. 2. Сопоставление результатов измерений (кривые с точками) с результатами модельных расчетов акустического импульса при использовании в качестве начального импульса Риды (штриховые линии) и модифицированного (сплошные линии)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом модифицированный импульс Риды лучше согласуется с «парашютной частью» эксперимента Mill Race. В общем случае можно предположить, что для углов выхода акустических лучей, по крайней мере больших 23° , предпочтительней использовать модифицированный импульс Риды, предложенный Дробжевой и Красновым [4], а при меньших углах – импульс Риды.

Список используемых источников

1. Misty Picture: A Unique Experiment for the Interpretation of the Infrasound Propagation from Large Explosive Sources / O. Gainville, Ph. Blanc-Benon, E. Blanc et al. // *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. – 2010. – P. 575–598.
2. Kinney G.F., Graham K.J. Explosive shocks in air. Springer. – New York, Tokyo. –1985.
3. Reed J.W. Atmospheric attenuation of explosion waves // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1977. – Vol. 61 (1) – P. 39–47.
4. Drobzheva Y.V., Krasnov V.M. Initial signature of an acoustic impulse and the model of its vertical-oblique propagation in the atmosphere (on the basis of results of Mill Race explosion // *Acoustical Physics*. – 1999. – Vol.45. – P. 190–195.

5. *Banister J. and Hereford W.V.* Observed high-altitude pressure wave from an underground and surface explosion // *J. Geophys. Res.* – 1991. – Vol. 96. – № D3. – P. 5185–5193.
6. *Коробейников В.П.* Задачи теории точечного взрыва. – М., 1986. – 400 с.
7. *Miles J.W.* Decay of spherical blast waves // *Phys. Fluids.* – 1967. – Vol. 10, № 12. – P. 2706–2708.
8. *Drobzheva Ya., Krasnov V.M.* The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground // *J. Atmos. and Solar–Terr. Phys.* – 2003. – Vol. 65, № 3. – P. 369–377.
9. *Hedin A.E.* Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // *Journal of Geophysical Research.* – 1991. – A96. – P. 1159–1172.

Г.М. Крученицкий*,
доктор физико-математических наук;
К.А. Статников**

* Центральная аэрологическая обсерватория, г. Москва

** Московский физико-технический институт – государственный университет, г. Москва

ЭВОЛЮЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА И ТЕМПЕРАТУРЫ НАД ЮЖНЫМ ПОЛЮСОМ

Построены регрессионные модели сезонного хода и долговременной изменчивости парциального давления озона и температуры по данным баллонного озонзондирования на станции Южный полюс. Сезонный ход построен по пяти гармоникам периодического годового колебания, а долговременная изменчивость по самому медленному из приливных колебаний (период 18,6 года) с привлечением в качестве регрессоров двух обертонов и двух унтертонов этого колебания. После исключения долгопериодного колебания, построенного таким образом, из остатков сезонного хода, как для парциального давления озона, так и для температуры на всех высотных уровнях, остается белый шум. Это свидетельствует об отсутствии в рядах наблюдений какой-либо информации, кроме упомянутых выше колебаний, в том числе и однонаправленных линейных трендов, с которыми принято отождествлять версию антропогенного воздействия.

Ключевые слова: озоносфера, статистическое моделирование, вертикальное распределение температуры, влияние долгопериодных приливных процессов на антарктическую атмосферу.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изучение механизмов изменчивости высотных профилей парциального давления озона и температуры в Антарктике, где в соответствии с [1] наиболее сильно проявляются последствия антропогенного воздействия на озоновый слой. Для более надежного выделения долговременной изменчивости в рядах высотного распределения парциального давления озона и температуры необходимо прежде всего выделить из этих рядов сезонный ход, на который приходится большая часть изменчивости, а затем произвести сравнительный анализ эффективности различных моделей долговременной изменчивости, а именно, сравнить линейные тренды (однонаправленные изменения, отождествляемые с антропогенной версией «истощения озонового слоя») и альтернативные колебательные модели с физически осмысленными механизмами. Такое сравнение тем более необходимо, что небольшой отрезок кривой, описывающей колебания, трудно отличим от прямой (линейного тренда).

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

В качестве исходных данных для анализа были выбраны данные баллонного озонзондирования на станции Южный полюс за период 27 лет (1986–2012). Для уменьшения степени лагунирования этих данных и приближения отсчетов к эквидистантным, необходимость чего убедительно обоснована в монографии [2], исходные данные были осреднены с шагом 1 месяц по времени и 1 км по высоте, после чего модель строилась на основе регрессионного соотношения:

$$V(h, t) = \sum_{k=1}^3 A_k(h) \cos\{k\omega[t - \Theta_k(h)]\} + R_{Seas}(h, t), \quad (1)$$

где $V(h, t)$ – моделируемая величина (парциальное давление озона или температура);
 $A_k(h)$ – амплитуда k -й гармоники на высоте h ;

$\Theta_k(h)$ – фаза k -й гармоники на высоте h ;

$R_{Seaz}(h,t)$ – остатки сезонного хода на высоте h .

Некоторые из результатов моделирования отражены на рис. 1 и 2.

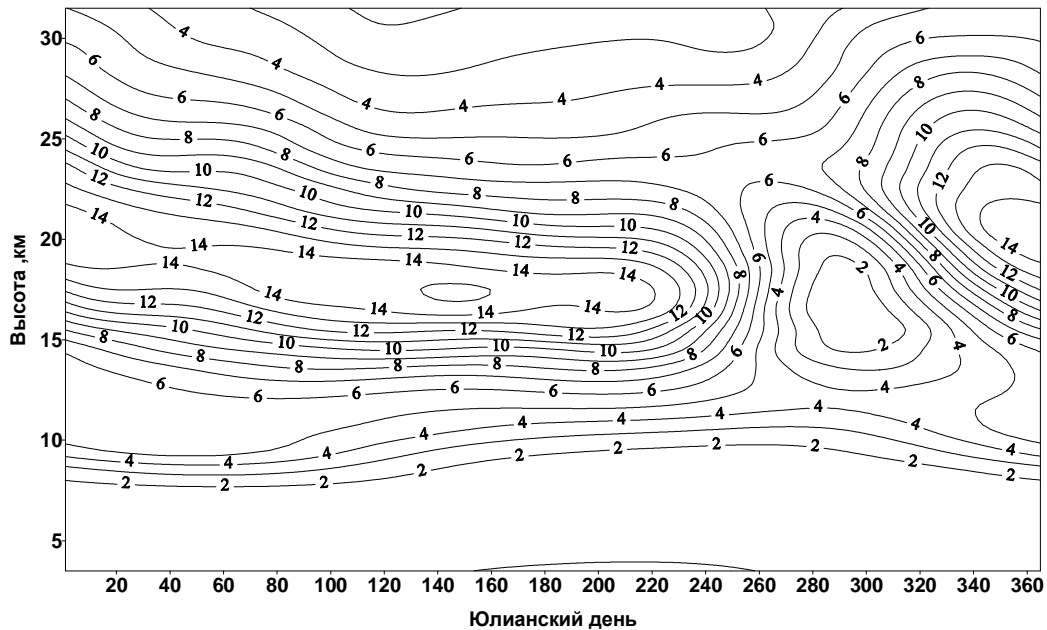


Рис. 1. Высотно-временной разрез сезонной изменчивости парциального давления озона, мПа

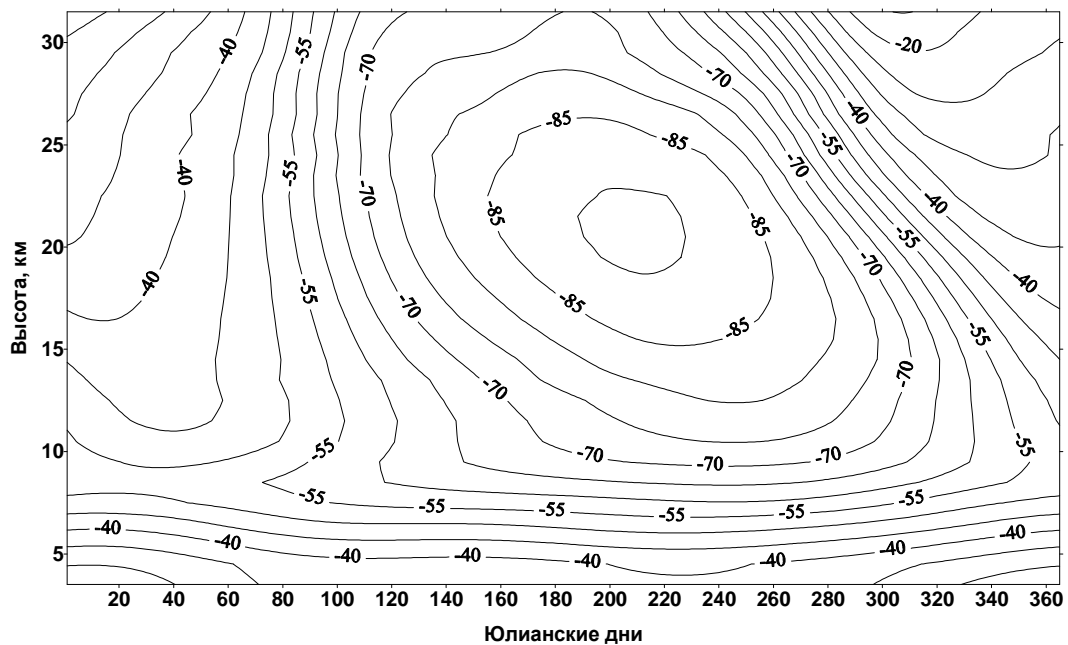


Рис. 2. Высотно-временной разрез сезонной изменчивости температуры, $^{\circ}\text{C}$

Отметим, что ограничение числа членов в модели (1) пятью вытекает из теоремы Котельникова при количестве отсчетов 12 на период (6 гармоник можно удерживать только при бесконечном соотношении сигнал/шум, чего не бывает ни в каких реальных наблюдениях).

Обращает на себя внимание очевидный из рис. 1 факт, что сезонная изменчивость вносит заметный вклад в формирование весенней антарктической аномалии. Это же подтверждается и рис. 3.

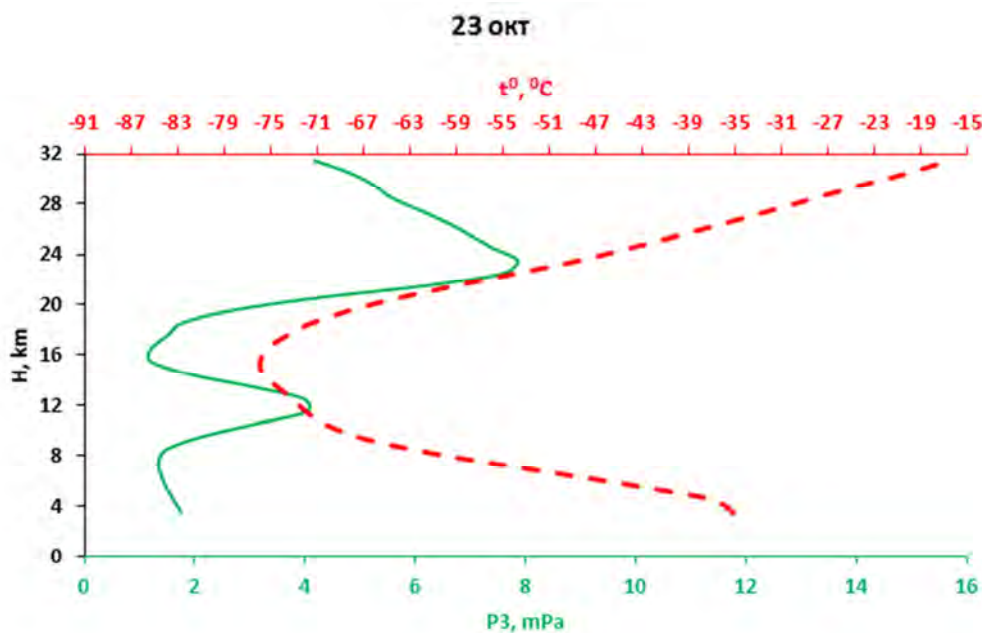


Рис. 3. Климатическая норма вертикального распределения озона (сплошная линия) и температуры (пунктир) за 23 октября

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Модель долговременной изменчивости строилась исходя из следующих физических соображений. Наименьшая из частот в спектре приливных колебаний, соответствующая периоду 18,6 лет, обусловленная колебаниями плоскости орбиты Луны относительно плоскости эклиптики [3], несомненно должна давать вклад в долговременную изменчивость как температуры (ввиду влияния приливных движений на теплообмен в системе океан-атмосфера), так и озона (благодаря эффекту Нормана – Добсона [4]). Причем естественно ожидать вклада в модель долговременной изменчивости не только основной частоты, но и ее гармоник (ввиду немонахроматичности колебаний плоскости орбиты Луны) и унтертонов (благодаря параметрическому резонансу [5]), что проявляется практически во всех геосферах [6]. В связи с этим модель долговременной изменчивости строится в следующем виде:

$$R_{Seas}(h, t) = \sum_{k=1}^3 A_k(h) \cos\{k\omega[t - \Theta_k(h)]\} + \sum_{k=2}^3 B_k(h) \cos\{\omega[t - F_k(h)]/k\} + R_{LT}(h, t) \quad (2)$$

где $R_{Seas}(h, t)$ – остатки моделируемой величины (парциального давления озона или температуры);

$B_k(h)$ – амплитуда k -го унтертона на высоте h ;

$F_k(h)$ – фаза k -го унтертона на высоте h ;

$R_{LT}(h, t)$ – остатки долговременной модели на высоте h .

В качестве альтернативной модели строилась обычная модель линейного тренда. При построении моделей долговременной изменчивости было установлено:

– коэффициенты детерминации для колебательных моделей вида (2) для всех высотных уровней превосходят коэффициенты детерминации линейных трендов, как для парциального давления озона, так и для температуры;

– остатки колебательных моделей для всех высотных уровней не имеют статистически значимых трендов как для парциального давления озона, так и для температуры;

– сходство остатков колебательных моделей с белым шумом для всех высотных уровней, как для парциального давления озона, так и для температуры, выше, чем сходство остатков трендов и по критерию статистики Дарбина – Уотсона [7], и по коэффициенту детерминации интегрированной периодограммы остатков прямой, проходящей через начало координат.

На рис. 4 проиллюстрировано, как колебательная модель обобщает тренд, заметно повышая коэффициент детерминации модели.

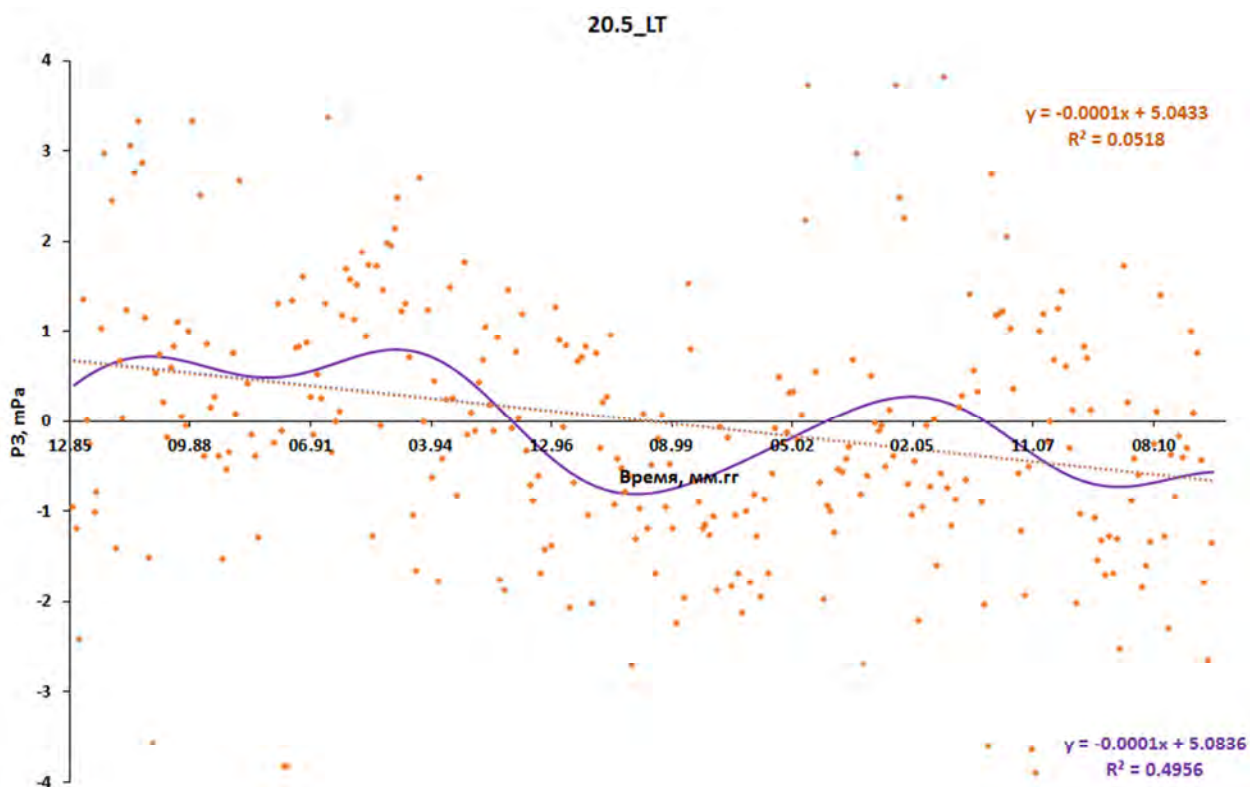


Рис. 4. Остатки сезонного хода парциального давления озона на высоте 20,5 км (точки), колебательная модель (сплошная линия, коэффициент детерминации 10,6%), линейный тренд (пунктир, коэффициент детерминации 5,2%)

Из рисунка видно, что уравнения линейного тренда и тренда колебательной модели практически совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения описанной выше работы установлено следующее.

1. Версия антропогенной обусловленности (фреоновая) долговременной изменчивости озонового слоя существенно уступает по надежности колебательной модели, обусловленной влиянием эффекта Нормана – Добсона, учитывающей немонохроматичность приливных явлений и параметрический резонанс с ними.

2. Приливные явления исчерпывающим образом объясняют долговременную изменчивость не только вертикального распределения озона, но и высотного хода температуры.

3. Фреоновая версия антарктической озоновой аномалии весьма уязвима для критики не только с динамической [8], но и со статистической точки зрения.

Список используемых источников

1. *Robinson S.A., Wilson S.R.* Environmental Effects of Ozone Depletion and its Interactions with Climate Change: 2010. – Assessment: University of Wollongong Research Online, 2010. – 330 p.
2. *Хургин Я.И., Яковлев В.П.* Финитные функции в физике и технике. – М.: Наука, 1971. – 408 с.
3. *Марчук Г.И., Каган Б.А.* Динамика океанских приливов. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 359 с.
4. *Хргиан А.Х.* Физика атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 282 с.
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц М.Е.* Механика. – М.: Физматгиз, 1958. – С.103–109.
6. *Kruchenitsky G.M., Statnikov K.A.* Statistical Modeling of Global Tectonic Activity and some Physical Consequences of its Results. *Journal of Systemics // Cybernetics and Informatics.* – 2015. – Vol.13, №1. – P. 51–55.
7. *Ван дер Варден Б.Л.* Математическая статистика. – М.: ИЛ, 1960. – 148 с.
8. О вкладе гетерофазных процессов в формирование весенней озоновой аномалии в антарктиде / А.М. Звягинцев, В.В. Зуев, Г.М. Крученицкий, Т.В. Скоробогатый // Исследования Земли из космоса. – 2002. – №3. – С. 29–34.

Ю.Ю. Куликов*,

доктор физико-математических наук;

А.В. Поберовский**,

кандидат физико-математических наук;

В.Г. Рыскин*,

кандидат физико-математических наук;

В.А. Юшков***,

кандидат физико-математических наук;

* Научно-исследовательский институт физики, г. Санкт-Петербург – Петродворец

** Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

*** Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный

ВЛИЯНИЕ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ ОЗОНА СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ АРКТИКИ

Изложены результаты исследования методом микроволновой радиометрии динамики содержания озона в средней атмосфере над Петергофом во время стратосферного потепления зимой 2016–2017 года. В наземных наблюдениях был использован мобильный микроволновый озонметр (рабочая частота 110.8 ГГц). Выполнены оценки вертикального распределения озона в области высот 22–60 км. Эти результаты были сопоставлены с бортовыми данными об общем содержании озона и высотными профилями озона и температуры в средней атмосфере. В атмосфере над Петергофом отмечались значительные (в несколько раз) вариации содержания озона на высотах 40–60 км, которые были вызваны стратосферным потеплением минорного типа.

Ключевые слова: средняя атмосфера, внезапные стратосферные потепления, озон.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время снова возник интерес к исследованиям взаимодействия средней (высоты 50–100 км) и верхней атмосферы (высоты выше 100 км). В результате проведенных экспериментов по искусственному воздействию на нижнюю ионосферу мощным КВ-радиоизлучением было обнаружено новое физическое явление – уменьшение интенсивности микроволнового излучения мезосферы в линии озона при нагреве ионосферы стендом СУРА [1, 2]. Взаимодействие ионосферы и мезосферного озона может возникать во время естественных возмущений, таких как внезапные стратосферные потепления. Отличной иллюстрацией такого события может служить потепление 2012–2013 года. В микроволновых и оптических наблюдениях в умеренных широтах над Томском (56° с.ш., 85° в.д.) были отмечены заметные вариации озона и температуры на всех высотах средней атмосферы [3, 4]. Концентрация озона на высотах от 25 до 60 км изменялась от 1,5 до 2 раз. Это было уникальное потепление, которое вызвало приращение температуры на уровне 10 гПа на 70 К относительно среднемесячного уровня. Суточные колебания озона на высоте 60 км, связанные с заходом и восходом Солнца, составили всего около 30%. Кроме того, это же потепление, согласно работе [5], вызвало вариации полного электронного содержания около 100 % в экваториальной ионосфере. В средних и полярных широтах изменения содержания электронов также связывают с вариациями нейтрального состава во время возмущений в тропосфере и стратосфере [6]. В работе [7] предполагается, что флуктуации в озоне средней атмосферы, вызванные потеплениями, могут воздействовать на ионосферу через приливные волны.

В настоящем сообщении мы представляем результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы в Петергофе (60° с.ш., 30° в.д.) в январе–марте 2016 года и в ноябре–марте 2016–2017 года во время небольших стратосферных потеплений. Следует отметить, что использование метода наземной микроволновой радиометрии дает важную дополни-

тельную информацию о поведении озона средней атмосферы при естественных и антропогенных возмущениях.

МОБИЛЬНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ ОЗОНОМЕТР. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Метод микроволновой наземной радиометрии основан на измерениях вращательных спектров излучения малых газовых составляющих (в нашем случае озона) в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. Микроволновые наблюдения слабо зависят от погодных условий и присутствия в атмосфере аэрозолей, а это является преимуществом по сравнению с наблюдениями в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. Кроме того, микроволновые наблюдения озона могут выполняться круглосуточно. В последнее десятилетие нам удалось достичь определенных успехов на пути создания мобильных микроволновых спектрометров [8].

Микроволновый озонметр состоит из гетеродинного неохлаждаемого приёмника, настроенного на фиксированную частоту 110836.04 МГц, которая соответствует вращательному переходу молекулы озона $\nu_{0,6} - \nu_{1,5}$ и многоканального анализатора спектра. На входе приёмника находится модуль, который включает в себя антенну (скалярный рупор) и коммутатор для калибровки интенсивности принимаемого атмосферного излучения в линии озона. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню -3 дБ составляет 5.4° . Однополосная шумовая температура приёмника соответствует 2500 К, режим приема в одной полосе обеспечивается заградительным фильтром с прямыми потерями 0.5 дБ и подавлением зеркального канала более 20 дБ. Анализатор спектра состоит из 31 фильтра с полосой пропускания от 1 МГц до 10 МГц и полной полосой анализа 240 МГц.

Параметры прибора позволяют измерять за 15 мин спектр линии излучения озона с точностью $\sim 2\%$. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполняются методом калибровки по двум «чернотельным» эталонам, которые находятся при температуре кипения жидкого азота и при температуре окружающего воздуха.

Информация о содержании O_3 содержится в измеряемом спектре интегрального радиоизлучения средней атмосферы. С помощью инверсии получаемых спектров можно получить данные о вертикальном распределении озона (ВРО) в атмосфере. Критерием правильности решения обратной задачи являлось наилучшее соответствие спектральной линии озона, рассчитанной по восстановленному профилю концентрации O_3 с исходным экспериментальным спектром. Погрешность определения ВРО по его измеренным спектрам вышеописанным прибором не превышает 20 %.

Один из таких мобильных озонметров был установлен в 2007 году на физическом факультете Санкт-Петербургского университета в Петергофе [9]. Прибор выполняет непрерывные микроволновые наблюдения озона средней атмосферы по настоящее время [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Ряд данных наблюдений озона средней атмосферы над Петергофом составлял по длительности около 8 месяцев, начиная с января 2016 года. Наземные микроволновые данные были сопоставлены с бортовыми измерениями озона и температуры средней атмосферы MLS/Aura и SABER. Кроме того, было выполнено сравнение данных наземного микроволнового зондирования с данными из прямых измерений вертикальных профилей озона в обсерваториях, которые расположены за Полярным кругом – это Sodankylä (67° с.ш., 27° в.д.), Summit (73° с.ш., 38° з.д.) и Салехард (67° с.ш., 67° в.д.), на первых двух станциях происходят регулярные запуски баллонных озонзондов.

На рис. 1 приведены данные бортовых измерений MLS/Aura над Петергофом по температуре на уровне 10 гПа, что примерно соответствует 30 км, для зимы 2016–2017 года. В эту зиму произошло два небольших стратосферных потепления в районе 19 января. Одно из них – в январе–марте 2016 года (тонкая кривая), а другое – в январе 2017 года (жирная кривая). Каждое потепление продолжалось около 10 дней, а максимальное отклонение температуры от фона составляло около 40 К. Для сравнения минорное потепление над Петергофом зимой 2013–2014 года имело продолжительность динамических возмущений около двух с половиной месяцев [13].

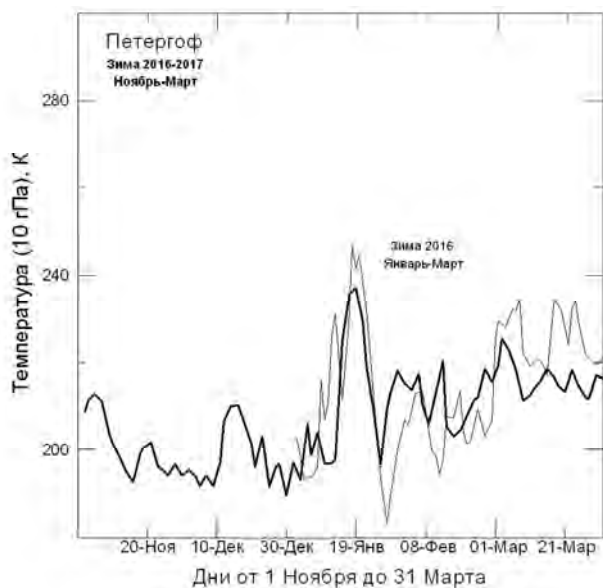


Рис. 1. Временной ход температуры на уровне 10 гПа над Петергофом зимой 2016–2017 года по данным MLS/Aura

амплитуда которых достигала 50 К. Изменения озона и температуры свидетельствуют о главенстве динамических процессов во время перестройки атмосферной циркуляции.

Вывод. В описанной выше работе получен важнейший результат, который касается обнаружения больших флуктуаций в озоне на высотах 40–60 км во время минорных стратосферных потеплений в приполярных широтах.

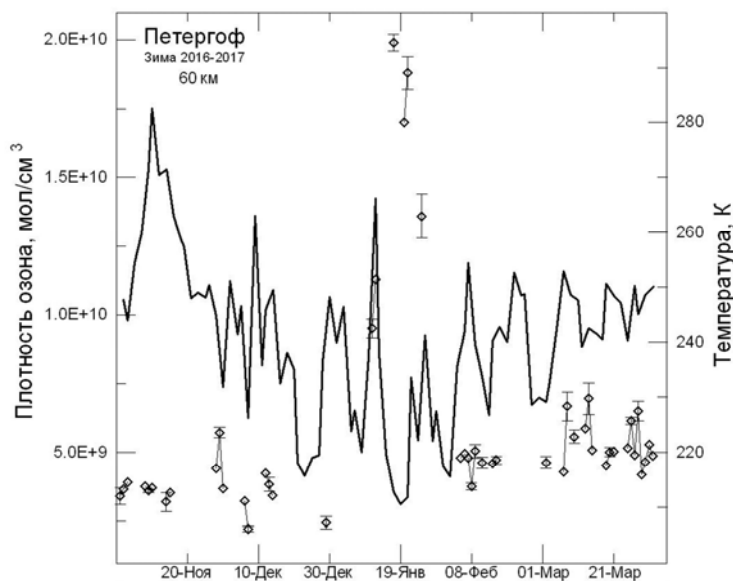


Рис. 2. Поведение озона (ромбы) и температуры (сплошная линия) на высотах средней атмосферы 25, 40 и 60 км. Квадратами показано поведение озона на высоте 25 км – это прямые баллонные измерения в Sodankylä (начало)

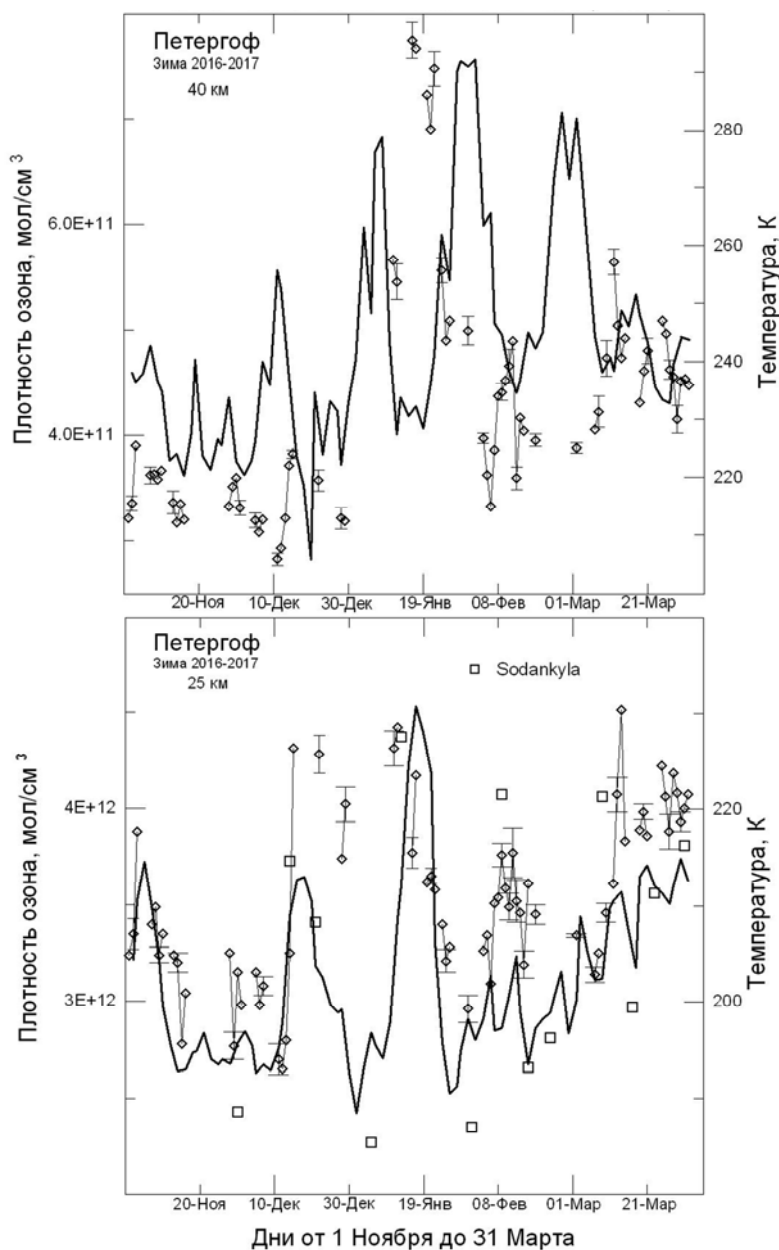


Рис. 2. Поведение озона (ромбы) и температуры (сплошная линия) на высотах средней атмосферы 25, 40 и 60 км. Квадратами показано поведение озона на высоте 25 км – это прямые баллонные измерения в Sodankyla (окончание)

Список используемых источников

1. Вариации микроволнового излучения мезосферы при нагреве нижней ионосферы мощными КВ радиоволнами / Ю.Ю. Куликов, Г.И. Григорьев, А.А. Красильников, В.Л. Фролов // Известия вузов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55, № 1–2. – С. 57–65.
2. Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением / Ю.Ю. Куликов, В.Л. Фролов, Г.И. Григорьев и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 1. – С. 102–109.
3. Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы во время стратосферного потепления в Западной Сибири / В.Н. Маричев, Г.Г. Матвиенко, А.А. Лисенко и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 1. – С. 46–52.

4. Study of the influence of the stratospheric warming in January 2013 on the vertical structure of ozone and temperature in the middle atmosphere over Tomsk using microwave and lidar diagnostics / G.G. Matvienko, Y.Y. Kulikov, V.N. Marichev et al // ILRC 27 EPJ Web of Conferences 119, 24002. – 2016.
5. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013 / L. Goncharenko, J.L.Chau, P. Condor, A. Coster, L. Benkevitch // Geophys. Res. Lett. – 2013. – Vol. 40. – P. 4982–4986.
6. *Kazimirovsky E.S.* Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // Ann. of Geophys. – 2002. – Vol. 45, №.1. – P. 1–29.
7. The potential role of stratospheric ozone in the stratosphere-ionosphere coupling during stratospheric warmings / L.P. Goncharenko, A.J. Coster, R.A. Plumb, D.I.V. Domeisen // Geophys. Res. Lett. – 2012. – Vol. 39. – L08101.
8. *Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Shchitov A.M.* New mobile ground-based microwave instrument for research of stratospheric ozone (some results of observation) // The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'07) Proceedings, Kharkov, Ukraine, June 25–30. – 2007. – Vol. 1. – P. 62–66.
9. Измерения вертикальных профилей содержания озона над Санкт-Петербургом наземной микроволновой аппаратурой / Ю.М. Тимофеев, В.С. Косцов, А.В. Поберовский и др. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 4. Физика и химия. – 2008. – Вып. 4, декабрь. – С. 44–53.
10. Наземный микроволновый мониторинг озона средней атмосферы над Санкт-Петербургом и Томском во время стратосферного потепления зимой 2013–2014 гг. // Д.А. Бочковский, Я.А. Виролайнен, Ю.Ю. Куликов и др. // Известия вузов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 4. – С. 299–307.

В.И. Куркин*,

доктор физико-математических наук, профессор;

А.А. Науменко*;

А.В. Подлесный*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИОНОЗОНДА С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛА ИНСТИТУТА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Предложена система мониторинга ионосферы и КВ радиоканалов с использованием современного цифрового ионозонда с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) сигнала. Дается краткое описание и характеристики ионозонда «Ионозонд-МС», совмещающего функции вертикального зондирования непрерывным ЛЧМ сигналом и приема сигналов наклонного зондирования от реперных ЛЧМ передатчиков. Приведены результаты эксплуатации Ионозонда-МС в режиме непрерывного мониторинга со скважностью 1 и 5 мин с 2012 года.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное и наклонное зондирование, ЛЧМ ионозонд, распространение КВ.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является представление системы мониторинга ионосферных возмущений и КВ радиоканалов в Азиатском регионе России, организованной на базе многофункционального ЛЧМ Ионозонда-МС [1, 2] и реперных ЛЧМ передатчиков. В качестве последних используются передающие комплексы ИСЗФ СО РАН, размещенные вблизи г. Усолъе-Сибирское и в г. Норильске, а также на территории обсерваторий ИКИР ДВО РАН вблизи г. Хабаровска и г. Магадана. Ионозонд-МС расположен на территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в п. Торы (Бурятия). На рис. 1 показана геометрия радиотрасс НЗ, включая реперные передатчики ААНИИ Росгидромета.



Рис. 1. Трассы НЗ для Ионозонда-МС, расположенного в п. Торы (Бурятия)

Использование сетей ионозондов вертикального и наклонного зондирования (ВЗ и НЗ) ионосферы для мониторинга состояния ионосферы и условий распространения КВ сигналов имеет многолетнюю историю [3–5]. В последние годы активно развиваются системы мониторинга с повышенным временным разрешением для исследования отклика ионосферы на быстро протекающие и плохо прогнозируемые явления на Солнце, в магнитосфере Земли, а также в нижележащей нейтральной атмосфере.

С 2015 года на базе сети модифицированных цифровых ионозондов реализуется Европейский проект Net-TIDE Project DPS-4D по исследованию влияния перемещающихся ионосферных возмущений (ПИБ) на характеристики КВ сигналов. В Австралии проводится многолетний комплексный эксперимент Spatial Ionospheric Correlation Experiment (SPICE) – ELOISE (Elevation OIS Experiment) для выяснения роли мелкомасштабных и среднемасштабных ПИБ в изменчивости ионосферных характеристик ото дня ко дню и влияния их на функционирование локационных радиосистем КВ диапазона [6]. Наряду с традиционными ионозондами вертикального зондирования DPS-4 в экспериментах использовались современные цифровые ионозонды наклонного зондирования.

В системе Росгидромета в настоящее время функционирует в режиме мониторинга сеть ЛЧМ ионозондов наклонного зондирования в полярных широтах [7, 8] и около десяти ионозондов ВЗ. Кроме того, в научных организациях ФАНО и Минобрнауки имеется около десяти работающих в непрерывном режиме ионозондов ВЗ на всей территории России, что явно недостаточно. Для сравнения – в Австралии во время указанного выше эксперимента параметры ионосферы диагностировались в 57 точках над территорией страны.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛЧМ ИОНОЗОНД ИСЗФ СО РАН

Координированные наблюдения на радиотрассах наклонного ЛЧМ зондирования, проводимые с конца 80-х годов в России, выявили потенциальную возможность исследовать данным методом динамику границ главного ионосферного провала в различных геофизических условиях и влияние неоднородностей ионосферы и мелкомасштабной турбулентности на характеристики КВ сигналов на радиолиниях [9–11]. Однако низкая скорость сканирования по частоте (100 кГц/с) и одноканальный прием ограничивали возможности сети радиотрасс как по временному разрешению, так и по необходимости проведения целевых координированных экспериментов с использованием прогноза интересных явлений, которые часто запаздывали или не оправдывались.

В ИСЗФ СО РАН разработан в качестве базового комплекса сети мониторинга многофункциональный ионозонд, реализованный на основе современной SDR-технологии (программно-определяемых радиосистем) и промышленных компьютеров (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид приемопередающей аппаратуры Ионозонда-МС

Блок передающего устройства выполнен на базе микросхем прямого цифрового синтеза AD9854 производства Analog Devices, приемное устройство создано по схеме прямого цифрового преобразования на основе плат цифрового радиоприёма производства ЗАО «Инструментальные системы» г. Москва.

Высокое качество и достоверность получаемых данных обеспечиваются стабилизацией частоты опорных генераторов и временной привязкой сигналов по сигналам ГНСС в реальном времени. Применение современной аппаратуры цифровой обработки сигналов (ЦОС) и прямой оцифровки на несущей частоте обеспечивают комплексу высокие динамические фазовые и амплитудные характеристики, сочетая в себе гибкость настройки и стабильность параметров приема. Основные характеристики Ионозонда-МС приведены в табл. 1.

Основной особенностью комплекса стало наличие большого количества программно контролируемых независимых приемных каналов и высокий динамический диапазон радиоприемных устройств. Это позволило реализовывать наблюдения сразу несколькими методами одновременно, и при этом не потребовалось временного разнесения циклограмм их работы [1].

Таблица 1

Характеристики Ионозонда-МС

Параметр	Значение
Тип зондирования	НЗ, ВЗ
Диапазон частот зондирования, МГц	1–30
Излучаемая мощность РПД, Вт	От 4 до 15 (типовое 8)
Измеряемые параметры сигнала	ДЧХ (ВЧХ), АЧХ, ПФ радиоканала
Скорость развертки, МГц/сек.	0,050–2,000
Тип РПрУ	Цифровой, АЦП 16 бит 100 МГц
Выход РПрУ	Квадратурный, 24 разряда 10 кГц
Чувствительность приемника	0.3 мкВ
Количество каналов приема	8
Выделение сигналов из шумов	Сжатие по частоте (до 80 Дб), фильтрация сосредоточенных шумов (подавление до 40 Дб)
Антенны	Дельта – передающая, две дельты – приемные

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИОНОЗОНДА-МС

Высокие эксплуатационные характеристики и надежность Ионозонда-МС подтверждены опытной непрерывной эксплуатацией комплекса более 6 лет в режиме мониторинга, в течение этого периода получены более 10 млн. ионограмм вертикального зондирования со скважностью 1 мин и более 1 млн. ионограмм наклонного зондирования для трасс различной ориентации и протяженности со скважностью 5 мин.

Анализ ионограмм вертикального и слабо наклонного зондирования выявил регулярное наличие проявлений мелкомасштабных ПИВ большой амплитуды (10–20 %) с характерным временем регистрации 3–16 мин и пространственным масштабом 30–50 км [12, 13]. Они проявляются на ионограммах ВЗ в виде дополнительных треков, которые могут быть идентифицированы при автоматической обработке как расслоение верхней ионосферы на F1 и F2 в летний период. Типичная среднемесячная вероятность регистрации дополнительных треков в средних широтах меняется от 10 % в периоды равноденствия до 15 % и более в зимний сезон. При этом в ночные часы возмущенные ионограммы практически не наблюдаются, а в дневные часы среднемесячная вероятность их регистрации достигает 40 % от общего числа ионограмм в этот период суток. Ввиду малого времени регистрации ПИВ они редко наблюдаются при стандартном 15-минутном режиме зондирования.

Возможность проведения непрерывного мониторинга состояния ионосферы с высоким временным разрешением, используя сеть ЛЧМ зондирования ИСЗФ СО РАН, открывает широкие перспективы для исследования ионосферных возмущений, обусловленных непредсказуемыми и быстро протекающими событиями типа землетрясений и солнечных вспышек [13–15]. В геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (п. Торы, Бурятия) во время ряда мощных землетрясений в 2012–2015 годах с магнитудой от 6,7 до 9 Mw зарегистрированы ионограммы слабо наклонного зондирования с отчетливо наблюдаемым эффектом «multicasp». На ионограммах НЗ во время вспышек регистрируется резкое увеличение наименьшей наблюдаемой частоты. Во время геомагнитных бурь в ночные часы местного времени наряду со стандартными модами распространения на широтных трассах наблюдаются аномальные сигналы с большими задержками, которые распространяются вне дуги большого круга. Появление дополнительных сигналов может быть обусловлено рефракцией в области полярной стенки главного ионосферного провала (ГИП) за счет широкой диаграммы направленности излучающей антенны на передающих пунктах. Отражающие сигнал участки ионосферы могут располагаться как в области главного ионосферного провала, так и вне него. По мере приближения (ГИП) к трассе распространения максимальная наблюдаемая частота аномальных сигналов начинает превышать МНЧ стандартных модов распространения, что можно считать косвенным подтверждением предположения об отражении этих сигналов в области полярной стенки ГИП. Во время самой мощной геомагнитной бури 24 цикла солнечной активности 17–19 марта 2015 года (буря Патрика) по данным Ионозонда-МС удалось контролировать движение ГИП в азиатском долготном секторе и зарегистрировать необычайно сильное (до 80 %) уменьшение электронной концентрации в обширном регионе на восстановительной фазе бури [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетних данных разработанного в ИСЗФ СО РАН многофункционального ЛЧМ ионозонда нового поколения показал высокую эффективность Ионозонда-МС при диагностике ионосферных возмущений различных масштабов в обширной зоне азиатского региона России. По своим техническим и эксплуатационным характеристикам Ионозонд-МС может быть рекомендован в качестве базового элемента региональной системы мониторинга ионосферы и КВ радиоканалов.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckprf.ru/ckpr/3056/>.

Список используемых источников

1. Новые возможности цифрового ЛЧМ-ионозонда / А.В. Медведев, И.Г. Брынько, А.Г. Ким и др. // Труды XXII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». – 2008. – Т.1 – С. 37–40.
2. Vertical ionosphere sounding using continuous signals with linear frequency modulation / A.V. Podlesny, V.I. Kurkin, A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky // Proceedings XXX URSI General Assembly, Istanbul, Turkey. – HP1-2. – URL:<http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/HP1-2.pdf> (дата обращения: 25.04.2018).
3. J.M. Goodman, J.W. Ballard, E. D. Sharp Trung Luong // Proceedings of Session G5 at the XXVth GA URSI, Published WDC-A, Boulder. – 1998. – P. 64–70.
4. Proceedings of Session G6 at the XXIVth GA URSI. – Boulder, Published WDC-A, 1995. – P. 59–64.

5. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях / В.А. Иванов, В.И. Куркин, В.Е. Носов и др. // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46, №11. – С. 919–952.
6. *Harris T., Cervera M., Meehan D. H.* SpICE: A program to study small-scale disturbances in the ionosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2012. – Vol. 117.
7. Автоматизированная аппаратура зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ в сети полярных геофизических станций / Н.А. Домрачёв, А.А. Колчев, А.Е. Недопекин и др. // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». – Таганрог – Дивноморское, 2013. – С. 582–587.
8. *Рогов Д.Д., Выставной В.М.* Исследование параметров распространения декаметровых радиоволн на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в арктическом регионе РФ // *Мир измерений.* – 2014. – Т. 7. – С. 20–26.
9. Dynamics of the auroral oval during geomagnetic disturbances observed by oblique sounding of the ionosphere in the Eurasian longitudinal sector / V.P. Uryadov, A.A. Ponyatov, G.G. Vertogradov et al // *Int. J. Geomagn. Aeron.* – 2005. – Vol. 6, №1.
10. Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений / В.П. Урядов, В.И. Куркин, Г.Г. Вертоградов и др. // Известия вузов. Радиофизика. – 2004. – Т. 47, № 12. – С. 1041–1056.
11. Response of the midlatitude ionosphere to extreme geomagnetic storms of the 23rd solar cycle / A.P. Potekhin, G.A. Zherebtsov, V.I. Kurkin et al // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2009. – Vol. 49, №. 8. – P.1218–1222.
12. Studying travelling ionospheric disturbances from near-vertical ionosphere sounding with high temporal resolution / A.V. Podlesnyi, V.I. Kurkin, O.A. Laryunin et al // *Proc. XXXI URSI General Assembly, Beijing, China.* – 2014. – GP2.27.
13. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016 / O.I. Bergardt, N.P. Perevalova, A.V. Podlesnyi et al // *J. Geophys. Res. Space Physics,* 122. – 2017. – P. 4736–4754.
14. Отклик характеристик распространения КВ-радиоволн на вариации рентгеновского излучения / В.А. Иванова, Н.М. Полех, В.И. Куркин и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2013. – Т. 10, №4. – С. 154–160.
15. Characteristics of HF Radio Waves Propagation along Subauroral and Mid-latitude Paths over Eastern Siberia during Magnetoactive Period in February 2014 / V.I. Kurkin, N.M. Polekh, S.N. Ponomarchuk et al // *PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6-9.* – 2015. – P. 1995–1998.
16. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17-19 марта 2015 г. / Н.М. Полех, Н.А. Золотухина, Е.Б. Романова и др. // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2016. – Т. 56, №5. – С. 557–571.

В.О. Лопуха*;
Н.В. Федосеева*,
кандидат географических наук
*РГГМУ, г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ ОБЛАЧНОСТИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПОЛЯРНЫХ ВИХРЕЙ ПО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Данная работа посвящена анализу микрофизического состава облачности полярных циклонов по данным мультиспектральных спутниковых изображений, полученных при помощи спутников SUOMI NPP и Aqua, Terra. Предложены методы для комплексного анализа микрофизического состава облачности мезомасштабных вихрей над полярными морями России.

Ключевые слова: спутниковая метеорология, полярные циклоны, SUOMI NPP, Terra.

Мезомасштабные вихри, образующиеся к полюсу от основной бароклинной зоны, получили название полярные циклоны. Акватория Северо-Европейского бассейна является наиболее хорошо изученной областью появления мезомасштабных полярных циклонов в Северном полушарии. Она благоприятна для формирования полярных циклонов ввиду значительной разницы температур в приводном слое. Такая разница усилена теплым атлантическим течением на севере и массивом дрейфовых льдов. Полярные циклоны над морями восточной части российской Арктики менее изучены, чем над западной ее частью [1].

Арктический климат играет главную роль в частоте появлений и интенсивности полярных циклонов. Формирование новых областей, благоприятных для зарождения и развития мезомасштабных циклонов, связано с глобальным потеплением и сокращением площади ледяного покрова в морях Северного Ледовитого океана. К таким районам относятся Восточно-Сибирское, Чукотское море и море Лаптевых. Это связано с тем, что ранее акватории вышеперечисленных морей в течение всего года были покрыты льдом, сейчас же летом и осенью они полностью освобождаются от него [2].

Размер полярных циклонов варьируется от 100 до 1000 км, т.е. их размер весьма незначителен в сравнении с внетропическими циклонами. Этим объясняет тот факт, что мезомасштабные циклоны трудно обнаружить в поле давления.

Для мезомасштабных полярных циклонов характерен короткий срок жизни, относительно крупномасштабных атмосферных вихрей. В среднем он составляет от нескольких часов до трех суток, при условии малоподвижности и нахождения над водной поверхностью они могут существовать в течение более продолжительного времени.

Процесс их зарождения и развития проходит быстро и характеризуется резким падением давления. Из-за малого количества метеорологических станций сложно определить давление на уровне море в центре мезомасштабного полярного циклона. Выделение полярных циклонов в отдельный подтип вызвано тем, что они относятся к морским системам со скоростью приземного ветра, превышающей 15 м/с. Средние значения скорости ветра лежат в пределах 18,5–23,5 м/с, иногда достигая ураганной силы, при сильной конвергенции ветра в нижних слоях и дивергенции в верхних слоях атмосферы [3].

Проявляемый к полярным циклонам интерес связан в первую очередь с внезапным и резким ухудшением погоды в зоне их возникновения и возможным участием этих мезовихрей в формировании глубинных водных масс в районах частого мезомасштабного циклогенеза. Осадки и облачность в таких мезовихрях распространяются по горизонтали на 150–250 км, по вертикали – до 3 км. Такие возмущения не имеют экстремальных высот из-за их малых

размеров и короткого времени существования. Для нижних слоев атмосферы в области полярных циклонов характерна неустойчивая термическая стратификация, вызванная перемещением холодного воздуха на относительно теплую подстилающую поверхность [4, 5].

Исследование полярных циклонов особенно актуально ввиду интенсивного освоения российской Арктики и возникновения в арктических морях России новых районов формирования мезоциклонов, вызванных резким уменьшением за последние годы площади ледового покрова Северного Ледовитого океана. Данные мультиспектральной спутниковой съемки, благодаря хорошему покрытию полярных регионов и относительно высокой периодичности, являются лучшим инструментом для мониторинга полярных циклонов, в отличие от синоптических карт и численных моделей прогнозов погоды. Применение метода цветового синтеза спутниковых изображений, основанного на использовании дальних ИК каналов, позволяет анализировать эволюцию облачной системы полярных циклонов в условиях как дневной, так и ночной съемки и полярной ночи, что особенно актуально в рассматриваемом регионе.

Полярный циклон был обнаружен в районе Баренцева моря при визуальном анализе спутниковых изображений 12 марта 2017 года (рис. 1). Проводился сравнительный анализ микрофизического состава поля облачности полярного циклона по данным мультиспектральных спутниковых снимков, полученных при помощи спектрорадиометров MODIS, установленных на борту спутника Terra, и VIRS метеорологического спутника SUOMI NPP (серии NOAA).

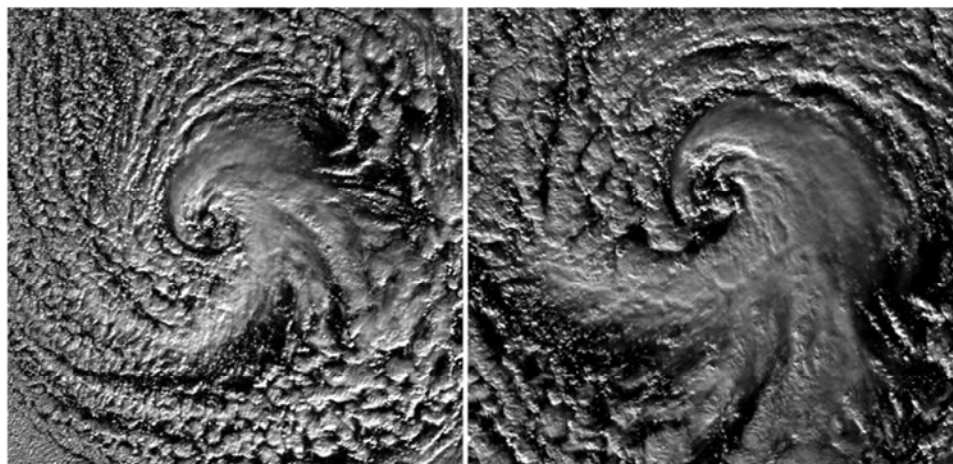


Рис. 1. Полярный циклон в районе Баренцева моря, 12 марта 2017 года, 8.35 UTC. Спутниковое изображение в видимом диапазоне: слева – MODIS (спутник Terra); справа – VIRS (спутник SUOMI NPP)

В ходе выполнения работы были получены цветосинтезированные изображения (модели А, В, С) с использованием каналов оптического и ИК диапазона. На рис. 2 приведены цветосинтезированные спутниковые изображения, позволяющие проанализировать микрофизический состав облачности полярного циклона в Баренцевом море. Таблица цветовых соответствий представлена на рис. 3.

Облачная система обнаруженного мезомасштабного полярного циклона имеет спиралевидную форму, в основном состоящую из больших ледяных кристаллов облачности верхнего яруса с вкраплениями мелких капель воды, составляющих массив слоисто-кучевой облачности. Наиболее отчетливо это прослеживается на спутниковом изображении MODIS (Terra) с применением модели В, в то время как изображение SUOMI NPP с аналогичной моделью менее информативно. Однако в случае использования модели А снимок SUOMI NPP позволяет более детально проанализировать микрофизический состав в сравнении с моделью А по

снимку MODIS (Terra) и выявить наличие капель воды малых размеров во внутренней части облачной спирали. При использовании Модели С данные обоих спутников (Terra, Suomi NPP) позволяют проанализировать микрофизический состав облачности с одинаковой детализацией.

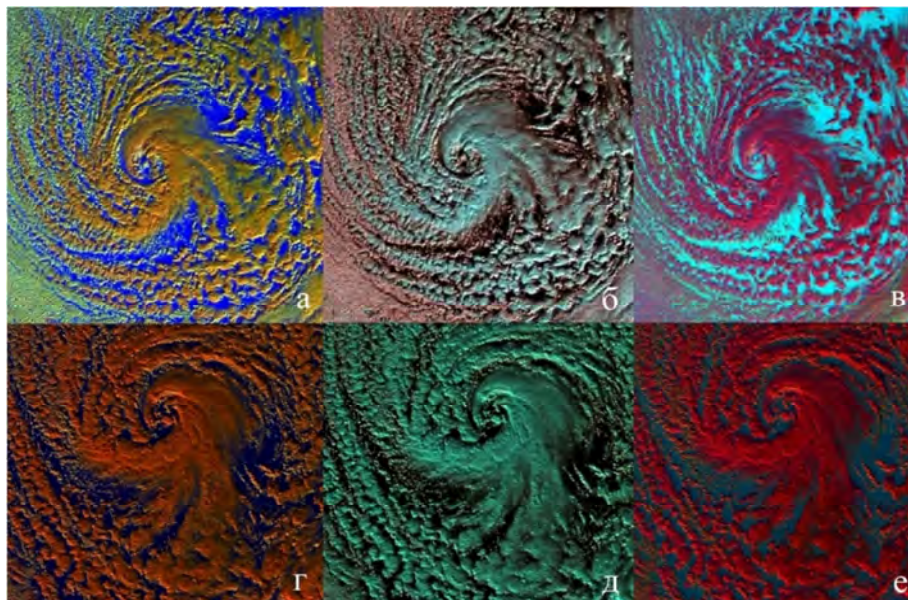


Рис. 2. Полярный циклон в районе Баренцева моря, 12 марта 2017 г., 8.35 UTC. Модель А, MODIS (Terra) (а), Модель В, MODIS (Terra) (б), Модель С, MODIS (Terra) (в), Модель А SUOMI NPP (г), Модель В, SUOMI NPP (д), Модель С, SUOMI NPP (е)

Модель А	Модель В	Модель С
Большие ледяные кристаллы	Снег	Большие ледяные кристаллы
Ледяные кристаллы малых размеров	Маленькие капли воды	Ледяные кристаллы малых размеров
Большие капли воды	Ледяные облака верхнего яруса	Большие ледяные кристаллы (C ₁)
Капли воды малых размеров	Земля	Ледяные кристаллы малых размеров (C ₂)
Океан	Океан	Океан
Растительность	Растительность	Растительность
Снег		Снег
		Капли воды малых размеров

Рис. 3. Таблицы цветовых соответствий различных типов подстилающей поверхности на спутниковых изображениях, полученных в условиях дневной съемки

Таким образом, можно прийти к выводу о том, что совместное использование различных моделей цветового синтеза и данных различных спутниковых систем является наилучшим решением для выполнения поставленной задачи. Стоит отметить, что благодаря более высокому пространственному разрешению (375 м) данные, полученные при помощи VIRS метеорологического спутника SUOMI NPP (серии NOAA), в сравнении с данными, полученными при помощи датчика MODIS (1 км), являются наиболее информативными и позволяют проводить детальный анализ, в том числе и отдельных конвективных ячеек поля облачности рассматриваемых полярных циклонов.

Список используемых источников

1. *Rasmussen E.A., Turner J.* Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. – Cambridge University Press, 2003. – 412 p.
2. *Заболотских Е.В., Гурвич И.А., Шапрон Б.* Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 2 – С. 64–77.
3. *Forsythe J.M., Haynes J.M.* CloudSat Observes a Labrador Sea Polar Low // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2015 – 96(8) – P. 1229–1231.
4. *Лагун В.Е., Язев А.И.* Глобальное распределение и временная изменчивость параметров циклонических возмущений в атмосфере // Доклады РАН. – 1994. – Т. 334, №5. – С. 642–645.
5. *Forbes G.S., Lottes W.D.* Classification of mesoscale vortices in polar aistreams and the influence of the large-scale environment on their evolutions // Tellus. – 1985. – Vol. 37A. – P. 132–155.

В.М. Петроченко **,

кандидат техн. наук, доцент;

В.Н. Шулейкин*,

доктор физико-математических наук;

Г.Г. Щукин **,

доктор физико-математических наук, профессор

* Институт проблем нефти и газа РАН

** Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Построено модельное представление связей водорода, метана, радона и атмосферного электрического поля. Представлены результаты контрастных вариаций атмосферного электрического поля над геологическими неоднородностями с повышенной концентрацией водорода и метана в шлейфах.

Ключевые слова: водород, метан, радон, атмосферное электрическое поле.

ВВЕДЕНИЕ

Первое экспериментальное подтверждение связей электрических параметров атмосферы с процессами в земной коре было получено в конце XIX века Императорской метеорологической обсерваторией в Токио. Анализ годового массива данных выявил наличие аномальных вариаций потенциала атмосферы до и после сейсмических событий в Японии [9]. На сегодняшний день можно найти несколько десятков работ, иллюстрирующих аномалии атмосферного электрического поля – АЭП перед сейсмическими событиями [2, 3].

Объемный заряд приземного воздуха обязан своим происхождением ионизации эксхалирующим почвенным радоном [5, 6]. Этот эффект использовался летом 1914 года в работах Московской радиевой экспедиции в Фергане при поисках радиоактивных руд [8]. В 1919 году в лабораторных условиях по уровню ионизации С.М. Курбатовым исследовались образцы горных пород, отобранные в Минусинском крае.

С учетом периода полураспада радона $\tau_{Rn} = 3,8$ суток его перенос к поверхности земли осуществляется с глубины 4–6 м. Молекулярный вес радиоактивного газа – 222 исключает возможность его обособленной субвертикальной миграции. Эксперименты последних лет показали, что ионизатор переносится пузырьковыми образованиями двух летучих газов – водородом и метаном [5, 6].

Полученный материал позволяет построить модель водород-метан-радоновых и атмосферно-электрических связей. Субвертикальный поток водорода и метана захватывает радон с глубины 4–6 м и выносит его в приповерхностные слои грунта и атмосферу. Образуемые в ходе ионизации в атмосфере легкие ионы определяют полярные проводимости; их рекомбинация с нейтральными ядрами конденсации задает атмосферное электрическое поле (АЭП).

Содержание радона грунта не менее чем в 100 раз превышает содержание радона атмосферы [4]. Это значит, что изменение выноса ионизатора в атмосферу в 2 раза не скажется на содержании радона в грунте. Однако в приповерхностной атмосфере подобные изменения приведут к двукратному изменению концентрации эксхалиции радона, к двукратному изменению АЭП. Другими словами, АЭП будет крайне чувствительно к изменениям плотности субвертикальных потоков газов-носителей – водорода и метана.

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ШЛЕЙФАХ МЕТАНА И ВОДОРОДА

На поле концентраций метана в тропосфере оказывает влияние нефтегазоносность недр. Например, содержание CH_4 в тропосфере над нефтяными и газовыми структурами Бухаро-Чарджоуской тектонической ступени в 1,2–1,5 раза выше среднепланетарных. Натурные исследования показали, что внутри проекции контура нефтяной залежи на поверхность земли имеет место рост концентрации горючего газа в приповерхностных слоях грунта (рис. 1) [1]. Работы выполнялись путем отбора образцов почвенного воздуха для последующего лабораторного анализа на содержание метана. Отношение средней концентрации метана над залежью и над вмещающими породами в режиме фонового отбора проб $\sim 1,7$; при вибровоздействии заметно выше $\sim 2,8$.

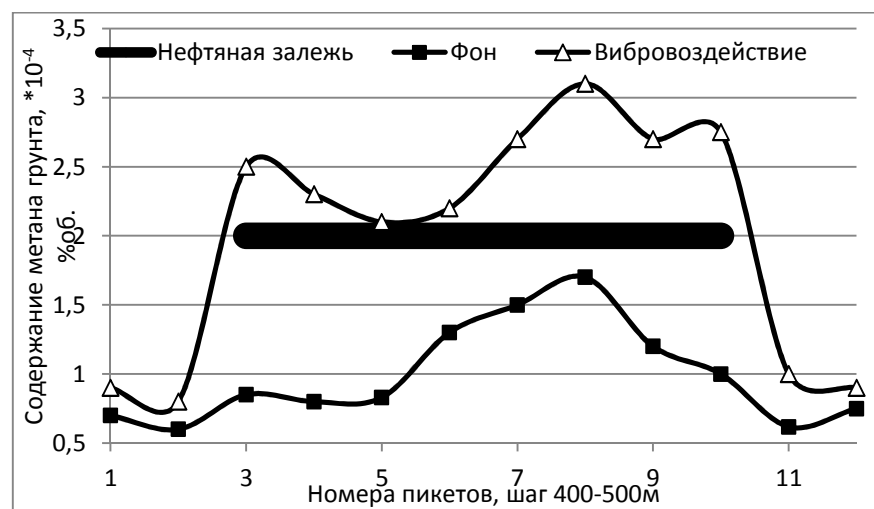


Рис. 1. Содержание метана грунта на профиле, пересекающем нефтяную залежь до (фон) и после вибровоздействия [1]

Первые результаты профильных наблюдений АЭП были получены на территории 3-го Речицкого нефтепромысла (Белоруссия) [7]. Измерения проводились дважды: первый раз летом 1989 года в непосредственной близости от только что пущенной в эксплуатацию нефтяной скважины; повторно вариации АЭП на профиле контролировались в 1992 году, после трех лет эксплуатации скважины (рис. 2). Как следовало ожидать, за три года спад поля над залежью существенно уменьшился – результат снижения внутрипластового давления в процессе эксплуатации, заводнения пласта, снижения плотности шлейфа углеводородов.

Аналогичный эффект удалось наблюдать в работах на Александровском нефтяном месторождении в Белоруссии. Здесь помимо АЭП на наблюдательных пикетах контролировался радон грунта. С достоверностью $\sim 0,8$ вариации АЭП удалось представить как функцию объемной активности радона над залежью и за ее пределами: $E(Rn)_{\text{залежь}} = 553,3 - 119,2 \cdot Rn$ [В/м], $E(Rn)_{\text{вне залежи}} = 377,4 - 55,2 \cdot Rn$ [В/м]; Rn нормирован на 1 Бк/л.

В 2001–2002 годах проводились профильные наблюдения АЭП над зоной аварийного разлива нефтепродуктов (рис. 3). Присутствие нефтепродуктов увеличило концентрацию метана в приповерхностных слоях грунта, что повлекло за собой рост эксхалации почвенного радона, т. е. регистрируемый спад АЭП.

В ходе очистных мероприятий содержание керосина в верховодке уменьшалось, что неизменно приводило к росту АЭП.

Электрохимические процессы в шапке рудного тела приводят к выделению водорода. Профильные работы на ильменит-магнетитовом рудопроявлении в Белоруссии показали наличие спада АЭП над зоной проекции месторождения на поверхность земли (рис. 4).

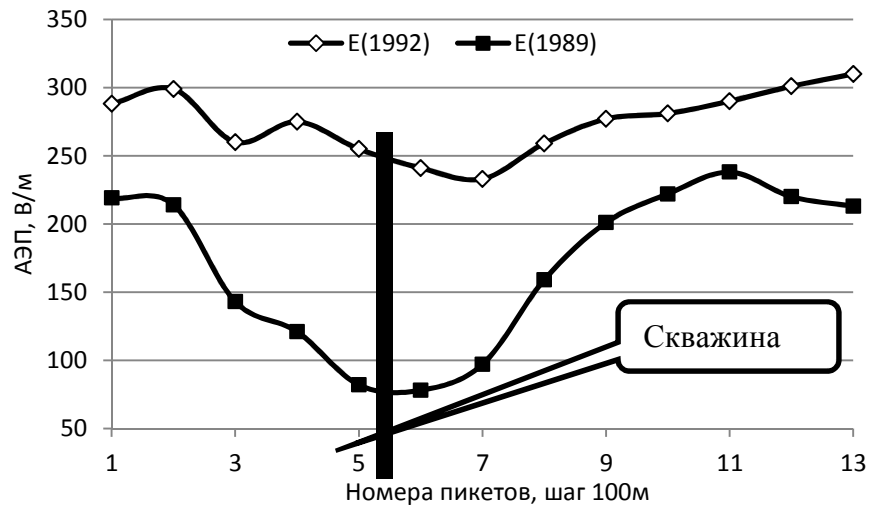


Рис. 2. Вариации атмосферного электрического поля у эксплуатационной скважины (3-й Речицкий нефтепромысел, Белоруссия)

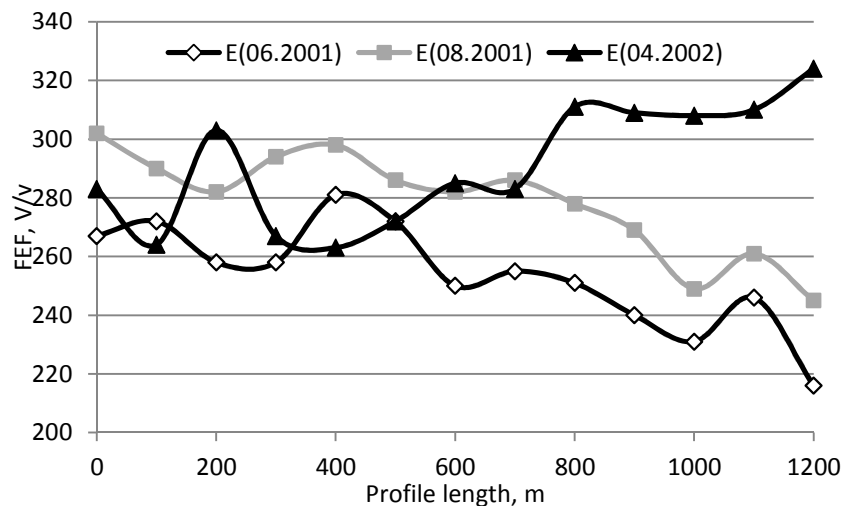


Рис. 3. Вариации АЭП над зоной аварийного разлива нефтепродуктов в ходе очистных мероприятий

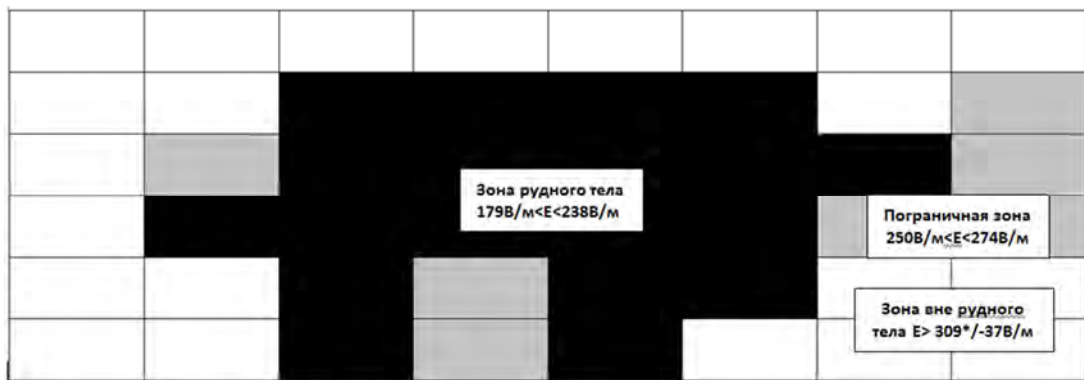


Рис. 4. Спад АЭП над зоной проекции ильменит-магнетитового рудопроявления на поверхность земли

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ЗОНАХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВОЗДУХООБМЕНА ПОЧВА – АТМОСФЕРА

В рассмотренных примерах спад АЭП был вызван повышенной плотностью субвертикального потока одного из газов-носителей. В зонах разуплотнения грунта естественного или искусственного происхождения можно наблюдать аналогичные эффекты, но уже за счет увеличения воздухообмена почва – атмосфера. В первую очередь это зоны разломов (рис. 5). Отрезки кривых на пересечении с разломом отмечены укрупненными маркерами.

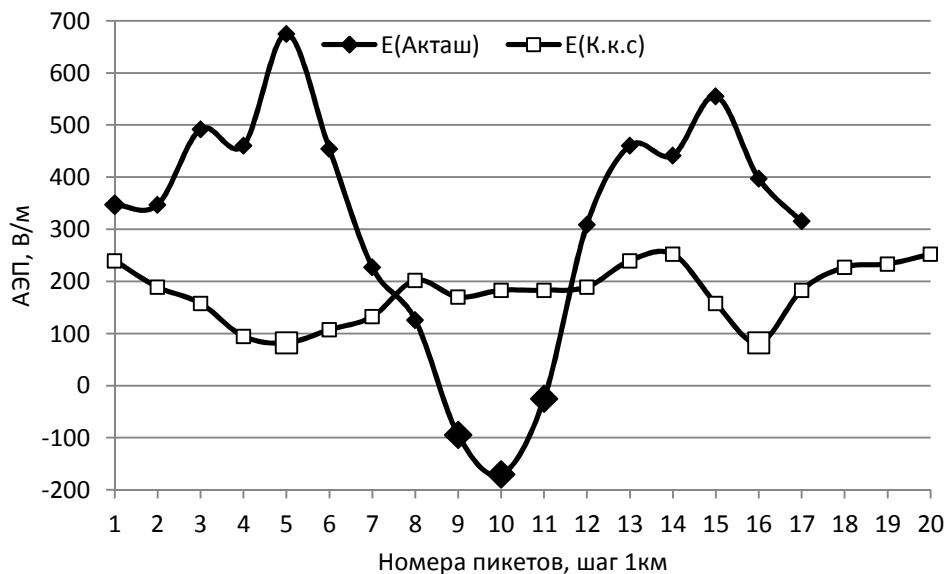


Рис. 5. Вариации АЭП над разломными зонами реки Акташ – $E(\text{Акташ})$ (Дагестан) и Калужской кольцевой структурой – $E(\text{К.к.с})$

Близкий результат был получен при работах на профиле общей длиной 13,7 км, где было найдено резкое увеличение мощности осадочных пород.

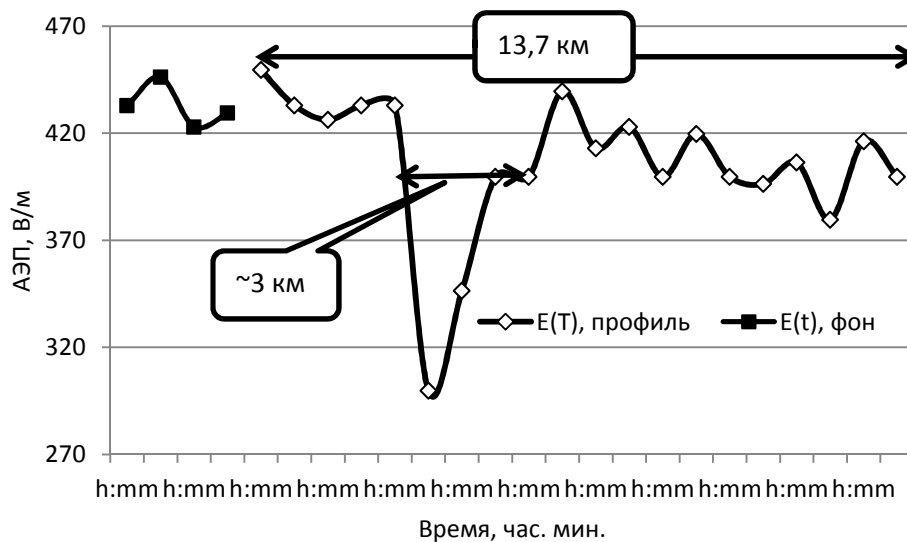


Рис. 6. Вариации АЭП над областью резкого понижения кровли фундамента – увеличения мощности осадочных пород

Газопроницаемость осадочных пород, естественно, больше коренных. Отсюда и рост плотности потока водорода и метана, рост эксхалации радона и неизбежный спад АЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты позволяют говорить об атмосферном электрическом поле как о полноправном геофизическом параметре, который можно эффективно использовать для исследования геологических неоднородностей:

– АЭП-профилирование выполняется непрерывно с борта движущегося автотранспортного средства, что исключает возможность пропуска искомого геологического объекта;

– высокая скорость производства наблюдений позволяет рассматривать АЭП как рекогносцировочный параметр и как характеристику, позволяющую с малыми трудозатратами контролировать текущую динамику исследуемой неоднородности.

Список используемых источников

1. О двух типах газово-геохимических эффектов в поле вибрационного источника сейсмических колебаний / С.М. Аммосов, Г.И. Войтов, Г.С. Коробейник и др. // Доклады академии наук СССР. – 1988. – Т. 301, № 1. – С. 62–68.
2. *Бончковский В.Ф.* Измерения градиента электрического потенциала в атмосфере, как один из возможных предвестников землетрясений // Труды Геофизического института. – 1954. – №25 (125). – С. 192–206.
3. *Руленко О.П., Иванов А.В., Шумейко А.В.* Краткосрочный атмосферно-электрический предвестник камчатского землетрясения 6.03.1992, $M=6,1$ // Доклады РАН. – 1992. – Т. 326, № 6. – С. 980–982.
4. *Сисигина Т.И.* Измерения эксхалиции радона с поверхности горных пород // Вопросы ядерной метеорологии. – М.: Госатомиздат, 1962. – С. 104–111.
5. *Шулейкин В.Н.* Радон почвенного и атмосферного воздуха и дегазация Земли // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. – 2010. – Вып. 1. – Эл. № ФС77-36038.
6. *Шулейкин В.Н., Шукин Г.Г., Куповых Г.В.* Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. – СПб.: Типография ЦОП РГГМУ, 2015. – 206 с.
7. *Шулейкин В.Н., Шукин Г.Г.* Исследование вариаций атмосферного электрического поля в районах нефтяных и газовых месторождений // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 2. – С. 21–29.
8. *Щербаков Д.* Находки месторождений радиоактивных минералов специальными методами поисков // Природа. – 1923. – № 7–12. – С. 97–100.
9. *Milne J.* Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena // Trans. Seismol. Soc. Jap. – 1990. – Vol. 15. – P.135–162.

В.В. Асмус*,
доктор физико-математических наук, профессор;
Н.И. Абросимов*;
Т.Н. Бурцева*;
В.Ю. Верятин*;
Г.М. Иоффе*;
В.А. Кровотынцев*,
доктор физико-математических наук;
О.Е. Милехин*,
кандидат физико-математических наук;
О.Г. Новикова*;
И.С. Пустынский*;
В.И. Соловьев*,
кандидат техн. наук;
И.А. Соловьева*
*ФГБУ НИЦ «Планета», г. Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОМЕТОБЕСПЕЧЕНИЯ

Авторы предлагают комплекс спутниковой информационной продукции, которая может быть использована для обеспечения гидрометеорологической безопасности войск и их наиболее эффективного применения в текущей деятельности, на различных театрах военных действий, особенно в районах, слабо освещенных в метеорологическом отношении, а также при планировании подготовки и применения войск на долгосрочный период.

Ключевые слова: гидрометобстановка, спутниковая информационная продукция, спутниковый мониторинг, климат, метеорологические явления.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях возрастают требования к точности прогнозов гидрометеорологической обстановки, заблаговременности предупреждения об опасных явлениях погоды и своевременному доведению гидрометеорологической информации до должностных лиц, принимающих управленческие решения.

При достижении указанных требований большую роль играет спутниковая гидрометинформация, особенно в районах с редкой сетью наземных, радиолокационных и зондировочных станций.

Спутниковые данные ФГБУ НИЦ «Планета» получает от 21 зарубежного и 8 отечественных спутников дистанционного зондирования Земли. Создано и внедрено более 40 видов специализированных программных комплексов (ПК) обработки спутниковых данных для получения информационной продукции. Среди них можно отметить PlanetaMeteo (многофункциональный ПК для подготовки карт нефанализа, прогноза эволюции облачных образований, мониторинга тропических циклонов и др.); SEVIRI-AN (ПК для построения карт высоты верхней границы облачности, максимальной влажности облачного слоя, максимальной мгновенной интенсивности осадков по данным КА серии Meteosat); PlanetaGS2 (ПК для построения глобальных и региональных карт облачности по данным видимого и ИК диапазонов геостационарных спутников серии Электро-Л, GOES, Meteosat, Himawari); ТВЗА-МКВ (ПК для получения оценок вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы с помощью сканера-зондировщика МТВЗА – ГЯ КА Метеор-М); ТВЗА-ИК (ПК для получения оценок вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы с помощью ИК зонди-

ровщика Метеор-М при отсутствии облачности); «Карты метеопараметров» (ПК для построения карт классификации облачности, высоты и температуры верхней границы облачности); «Мониторинг снежного покрова» (ПК для создания карт снежного покрова в различных регионах страны) и др.

ФГБУ НИЦ «Планета» выпускает более 460 видов информационной продукции (более 1,3 Тбайт в сутки), в том числе в интересах ВС РФ. Спутниковая информационная продукция передается, как правило, через органы Гидрометслужбы ВС РФ (ГМС ВС). Между ФГБУ НИЦ «Планета» и ГМС ВС установлен прямой канал связи 64 Кбайт.

СПУТНИКОВАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ПРОДУКЦИЯ

Ниже приведены некоторые виды спутниковой информационной продукции, которые могут быть использованы в интересах гидрометобеспечения Вооруженных сил:

1) по данным геостационарных и полярно-орбитальных метеорологических спутников (серии GOES, Meteosat, Himawari, Метеор) ежедневно выпускаются *глобальные карты облачности, монтажи космических изображений облачности;*

2) *карты параметров облачного покрова* (высота и температура верхней границы облачности, количество и формы облаков) по данным КА серии Meteosat, Himawari, NOAA, MetOp;

3) *карты нефанализа и эволюции облачных образований.* Информация об облачности (готовится по данным КА серии NOAA) предназначена для анализа и прогноза погоды, комплексного изучения процессов, протекающих в атмосфере, обеспечения авиации и других потребителей;

4) *монтажи космических изображений тропических циклонов* (по данным геостационарных спутников серии GOES, Meteosat, Himawari) с указанием траектории их движения и интенсивности. Информация востребована на территории Дальнего Востока и при обеспечении проводки судов;

5) *карты полей ветра в различных слоях атмосферы* (до 4 км, 4–7 км и выше 7 км). Поле ветра формируется по облакам-трассерам.

Карты создаются ежедневно по данным геостационарных спутников (КА Электро-Л). Данная продукция усваивается в схемах численного прогноза погоды, применяется при обеспечении авиации.

Выпускаются ежедекадные композитные *карты температуры поверхности океанов* на основе данных измерений в ИК диапазоне с зарубежных геостационарных КА серии GOES, Meteosat, Himawari и полярно-орбитальных КА серии NOAA, TERRA, AQUA.

Выпускаются *карты полей скорости и направления приводного ветра* над акваториями морей России (Черного, Азовского, Каспийского). Карты составляются по данным КА MetOp и предназначены для прогнозов погоды, волнения и штормовых нагонов, обеспечения безопасности судоходства.

Создаются *спутниковые изображения шлейфов облаков вулканического пепла.* Эти карты могут быть совмещены с картой термобарического поля. Кроме того, осуществляется моделирование процессов распространения облака вулканического пепла на вторые сутки после выброса в слоях 0–5 км, 5–10 км, 10–12 км. В основном эта продукция предназначена для обеспечения безопасности. Информационная продукция формируется на базе данных КА Метеор-М, Landsat.

Выпускаются *карты метеорологических явлений* (по данным КА серии Meteosat, Himawari):

- атмосферных явлений (гроза, шквал, осадки, облачность, град);
- фазы осадков;

- интенсивности гроз;
- максимальной интенсивности осадков;
- максимальной скорости восходящих движений воздуха;
- максимальной скорости ветра;
- максимальной скорости ветра при порывах [с использованием результатов гидродинамической модели регионального прогноза (ГМРП) Лосева В.М.];
- модуля сдвига ветра с высотой (м/с/100м) в слое 1000–925гПа (с использованием результатов ГМРП);
- скорости и направления ветра на стандартных изобарических поверхностях;
- высот стандартных изобарических поверхностей;
- оценочной температуры воздуха у земли (с использованием результатов ГМРП);
- температуры воздуха на стандартных изобарических поверхностях (с использованием результатов ГМРП);
- ожидаемой интенсивности осадков (с использованием результатов ГМРП);
- интенсивности обледенения (с использованием результатов ГМРП);

Карты ледовой обстановки выпускаются (по данным КА серии NOAA, TERRA, AQUA, Suomi NPP, Метеор-М) раз в неделю по замерзающим морям России. Позволяют оперативно оценивать обстановку на судоходных трассах, планировать ледокольные операции, предназначены для обеспечения безопасности навигации.

Карты границ распространения снежного покрова выпускаются (по данным КА серии NOAA, Метеор-М) раз в сутки по данным полярно-орбитальных спутников. На картах выделяются районы залегания сплошного и сухого снежного покрова, а также районы таяния снега. Карты предназначены для подготовки гидрологических прогнозов и решения других задач.

Данные температурно-влажностного зондирования атмосферы (поля температуры и влажности на различных изобарических поверхностях) получают от микроволнового зондировщика (МТВЗА-ГЯ) и ИК зондировщика (ИКФС-2), установленных на КА Метеор-М № 2. Данные используются в синоптическом анализе и численном прогнозе погоды.

Создаются *комплексные карты спутниковых и грозорегистрационных данных о грозах* (по Московскому региону).

Кроме перечисленной выше спутниковой информационной продукции с помощью космических систем гидрометеорологического назначения осуществляется мониторинг *загрязнения морских акваторий* (КА серии Канопус-В, Ресурс-П), *лесных пожаров* (КА Terra, Aqua, Suomi NPP, NOAA и отечественных КА серии Канопус-В, Ресурс-П, Метеор-М), *наводнений, снижения водности крупных рек и массовой гибели малых рек* (КА Канопус-В, Ресурс-П, Landsat-8).

Данные перечисленных видов мониторинга Земли необходимо учитывать при боевой подготовке войск и их применении на различных театрах боевых действий.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРИМЕНЕНИЕ ВОЙСК

Глобальные изменения климата (изменение режима сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты, наводнения, пожары, эрозионные явления, изменения температурного режима и др.) будут представлять угрозу национальной безопасности страны и окажут существенное влияние на обеспечение военной безопасности и применение Вооруженных сил РФ.

К «климатическим» угрозам в области национальной обороны можно отнести следующие:

1. Изменение ледовой обстановки в Арктике (претензии других государств на судоходство в Арктике, добычу полезных ископаемых, расширение шельфовой зоны).

2. Разрушение инфраструктуры в северных регионах в зоне вечной мерзлоты (снижение прочности зданий, инженерных сооружений, коммуникаций – авто, железнодорожный и трубопроводный транспорт).

3. Ухудшение условий эксплуатации военной техники и оборудования.

4. Распространение опасных инфекционных и паразитарных заболеваний среди личного состава.

5. Миграционные процессы, которые потребуют укрепления границы государства.

ФГБУ НИЦ «Планета» ведет долговременные архивы спутниковых данных Госфонда РФ. На основе этих данных формируются многолетние ряды тематических карт характеристик ледяного покрова Арктики, Антарктики, снежного покрова, которые используются в качестве индикаторов климатических изменений.

Выпускаются обзорные карты границ распространения морского льда в Арктике и карты границ распространения многолетнего и однолетнего льда в российском секторе Арктики. Данные виды продукции готовятся по данным активных микроволновых измерений (радиолокаторов и скаттерометров). Упомянутые виды продукции выпускаются в ФГБУ НИЦ «Планета» с периодичностью 1 раз в неделю.

По данным КА серии NOAA, TERRA, AQUA и «Метеор-М» исследуются сезонные и межгодовые изменения площади припая и плавучего льда в Каспийском море в зимние периоды, начиная с 2004 года.

Проводится спутниковый мониторинг изменений почвенного покрова, состояние которого будет оказывать влияние на инженерную инфраструктуру, состояние дорог, проходимость техники и условия маскировки.

Многолетние наблюдения за тропическими циклонами позволяют оценить в перспективе возможность и периоды применения Вооруженных сил в районах, подверженных влиянию ТЦ.

Многолетний мониторинг водных объектов несет информацию об изменении русловых процессов, площади зеркала озер, что, в свою очередь, влияет на эксплуатацию речного транспорта, положение государственной границы, проходящей по руслам рек, размещение и содержание инфраструктуры войск.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковые информационные продукты, полученные в результате тематической обработки данных космических метеорологических систем, могут быть использованы для решения задач гидрометеобеспечения (при подготовке прогнозов гидрометеорологической обстановки и выдаче соответствующих рекомендаций командованию) текущей деятельности войск, их применения на различных театрах военных действий, особенно в районах слабо освещенных в метеорологическом отношении, а также при планировании их применения на долгосрочный период.

Список используемых источников

1. Использование изображений со спутников в анализе и прогнозе погоды: техническая записка ВМО № 124 / под ред. Р.Н. Андерсона и Н.Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеиздат, 1974.

2. *Вельтищев Н.Ф., Попова Т.П.* Методическое письмо. Использование данных наблюдений об облачности со спутников в синоптическом анализе // Вопросы спутниковой метеорологии. – 1970. – Вып. 4.

3. Компьютерные технологии формирования гидрометеорологических карт по спутниковым изображениям. / А.А. Воронин, В.В. Еремеев, Г.М. Иоффе и др. // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4.
4. Домбковская Е.П., Озерова Г.М. О некоторых признаках эволюции облачности // Труды ГосНИЦИПР. – 1985. – Вып. 20.
5. Минина Л.С. Практика нефанализа / под ред. В.А. Бугаева. – Л.: Гидрометеиздат, 1970.
6. Приходько М.Г. Использование спутниковой информации в синоптической практике: метод. пособие. – М.: Гидрометеиздат, 1982.
7. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / под ред. И.П. Ветлова и Н.Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеиздат, 1982.
8. T.L. Olander and C.S. Velden, The Advanced Dvorak Technique (ADT) – Continued Development of an Objective Scheme to Estimate Tropical Cyclone Intensity Using Geostationary Infrared Satellite Imagery // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2007.

И.А. Готюр*,
доктор техн. наук, доцент;
Д.А. Денисенков*,
кандидат физико-математических наук;
В.Ю. Жуков*,
кандидат техн. наук;
Д.М. Караваев*,
кандидат техн. наук;
Е.А. Коровин*,
кандидат техн. наук;
Ю.В. Кулешов*,
доктор техн. наук, профессор;
С.В. Чернышев*,
кандидат техн. наук;
С.Э. Чёрный*,
кандидат техн. наук;
Г.Г. Шукин*,
доктор физико-математических наук, профессор;
ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ВОЕННО-КОСМИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ ИМЕНИ А.Ф. МОЖАЙСКОГО

Рассмотрены состояние и перспективы создания геофизической обсерватории как методического центра по испытанию информационно-измерительных систем геофизического обеспечения и проведению научных исследований в области прикладной гидрометеорологии. Представлены состав средств гидрометеорологических и геофизических измерений и структура создаваемой в п. Лехтуси геофизической обсерватории.

Ключевые слова: геофизическая обсерватория, гидрометеорологические прогнозы, ионосферное зондирование, метеорологическая радиолокация, гронопеленгация, валидация спутниковой информации.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является развитие исследований [1, 2], направленных на создание геофизической обсерватории в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Широкий спектр поставленных задач связан с выполнением функций методического центра по испытанию новых технологий, измерительных комплексов и приборов гидрометеорологического и геофизического назначения, обеспечением образовательной деятельности и повышением квалификации специалистов гидрометеорологических подразделений Минобороны РФ, проведением научных исследований в области прикладной геофизики [2]. В статье сформулированы основные задачи создаваемой геофизической обсерватории, ее структура и оснащение современными техническими измерительными комплексами. Также поднимаются вопросы использования геофизической обсерватории для решения актуальных проблем (валидации спутниковой информации, развития технологий анализа и прогноза гидрометеорологической и геофизической обстановки и др.) и проведения перспективных научных исследований в области прикладной метеорологии.

ЗАДАЧИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Специальная геофизическая обсерватория ВКА имени А.Ф. Можайского создается на Северо-Западе России в поселке Лехтуси Ленинградской области (на удалении около 40 км к северо-востоку от Санкт-Петербурга). Геофизическая обсерватория создается в целях организации оперативного контроля состояния различных слоев атмосферы и гидросферы на основе применения современных контактных и дистанционных наземных и спутниковых методов и средств зондирования природной среды и предоставления возможности практического освоения методик, технологий и особенностей эксплуатации современных средств информационного гидрометеорологического и геофизического обеспечения.

В задачи геофизической обсерватории входят: организация мониторинга состояния атмосферы и ионосферы различными техническими средствами; проведение испытаний методов и технологий прогноза опасных явлений погоды на основе применения методов и средств дистанционного зондирования атмосферы; прием и обработка космической метеорологической информации; проведение подспутниковых наблюдений; разработка и испытания методов и средств воздействий на гидрометеорологические и геофизические процессы и явления; создание постоянно пополняемого архива и сервера баз данных гидрометеорологической и геофизической информации.

Направления развития системы инструментальных наблюдений геофизической обсерватории включают совершенствование различных средств контактных и дистанционных методов и средств контактных и дистанционных измерений параметров атмосферы, в том числе: наземных измерений метеорологических параметров атмосферы; комплексного аэрологического зондирования атмосферы; радиолокации облаков, осадков; дистанционного ветрового зондирования; атмосферно-электрических измерений; зондирования ионосферы; радиометрического зондирования температурно-влажностных параметров тропосферы; а также комплексов приема спутниковой информации.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

В структуре специальной геофизической обсерватории можно выделить три функциональных подсистемы:

- 1) комплекс наземных средств гидрометеорологических и геофизических измерений;
- 2) автоматизированную систему сбора, анализа и прогнозирования гидрометеорологической и геофизической обстановки;
- 3) подсистему взаимодействия и обмена данными с потребителями.

В настоящее время в состав комплекса наземных средств гидрометеорологических и геофизических измерений включены следующие аппаратно-программные комплексы (АПК):

- измерения приземных гидрометеорологических параметров (АПК-1);
- радиолокационных измерений облаков и осадков (АПК-2);
- аэрологического зондирования атмосферы (АПК-3);
- геофизических исследований ионосферы (АПК-4);
- экологических исследований (АПК-5);
- приема и обработки спутниковых данных (АПК-6);
- атмосферно-электрических измерений и грозопеленгации (АПК-7).

В состав АПК-1 входят автоматизированная метеорологическая станция АМС (измерение приземных значений влажности и температуры воздуха, давления); измеритель параметров ветра ультразвуковой ИПВ-У; всепогодный датчик осадков ИКО-1; измеритель метеорологической дальности видимости ФИ-4; измеритель высоты нижней границы облачности; почвенные термометры АМТ-5 и др.

В состав АПК-2 включены метеорологические радиолокаторы МРЛ-5, МРМЛ, «Контур-Метео-01». Для повышения качества анализа полей водности конвективных облаков и интенсивности осадков рассматривается вариант модернизации МРЛ-5 для работы в режиме пассивно-активных наблюдений.

В состав АПК-3 включены аэрологическая станция «Полюс» и микроволновые радиометры, обеспечивающие непрерывные измерения водозапаса облаков, температурно-влажностных параметров воздуха в тропосфере. Информация наземных микроволновых радиометров обеспечивает непрерывность измерений в периоды между запусками радиозондов, особенно важно при развитии динамических процессов в атмосфере, связанных с прохождением атмосферных фронтов, мезомасштабных явлений.

АПК-4 включает ионозонд вертикального или наклонного зондирования ионосферы и радиолокационный комплекс диагностики ионосферы МК-31 НПО «Тайфун».

АПК-5 обеспечивает анализ экологической обстановки.

АПК-6 построен на базе станции приема спутниковой информации (СПСИ) «Сюжет-МБ» и обеспечивает прием и обработку спутниковой информации.

АПК-7 включает приборы атмосферно-электрических измерений – приборы измерения напряженности электрического поля «Рябина» и сеть 3 грозопеленгаторов в Ленинградской области.

Получаемые измерительными комплексами геофизической обсерватории данные передаются в единый центр сбора и обработки гидрометеорологической информации, на базе которого реализуются современные технологии анализа, усвоения и использования разнородной гидрометеорологической информации. Для организации автоматизированного сбора, отображения, хранения и анализа гидрометеорологической обстановки создан аппаратно-программный комплекс и автоматизированное рабочее место военного гидрометеоролога (комплекс АРМ-ВГМ).

Среди перспективных измерительных комплексов рассматриваются автоматизированный комплекс распределенных неконтактных датчиков осадков; средства актинометрических измерений, озонметрическая станция, лидары и др. Для задач валидации радиолокационных спутниковых данных на территории обсерватории планируется разместить 9 калибровочных пассивных уголкового отражателей, имеющих топогеодезическую привязку.

Научно-методические разработки и опыт создания геофизической обсерватории в п. Лехтуси планируется распространить для организации на территории России подсистемы из трех типовых специализированных обсерваторий. Для проведения подспутниковых измерений в различных регионах, в том числе над океанами, рассматриваются варианты создания подвижных авиационных и корабельных платформ.

Предполагается развитие подсистемы обмена данными с организациями федерального и регионального уровней, которые решают задачи получения, обработки и систематизации гидрометеорологической и геофизической информации (ГГМЦ МО РФ, 373 Центр ВМФ, НИЦ «Планета», ИПГ, ВНИИГМИ-МЦД, НПО «Тайфун», РГГМУ, СПбГУ), а также объединение усилий организаций, расположенных на территории Ленинградской области и имеющих экспериментальную базу, для проведения комплексных подспутниковых экспериментов (СПбГУ, РГГМУ, ААНИИ, ИНОЗ РАН, ИПА РАН и обсерватория «Светлое»).

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Среди широкого круга задач, решаемых с помощью геофизической обсерватории выделим следующие:

1. Методическое обеспечение испытаний новых технологий и средств гидрометеорологического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ).

2. Обеспечение проведения учебных занятий и подготовки специалистов в ВКА имени А.Ф. Можайского по дисциплинам «Физика океана, вод и суши», «Синоптическая метеорология», «Технические средства гидрометеорологической службы», проведения эксплуатационной практики по дисциплинам «Синоптическая метеорология», «Технические средства гидрометеорологической службы» и «Гидрометеорологическое и геофизическое обеспечение войск».

3. Научные исследования.

Планируемые к реализации научные исследования включают:

– совершенствование сверхкраткосрочного прогноза погоды на основе усвоения в мезомасштабной модели атмосферы данных дистанционного зондирования атмосферы (МРЛ, Грозопеленгаторы, ПНП, СВЧ-радиометров, СПСИ «Сюжет-МБ» и др.);

– разработка методов диагноза и сверхкраткосрочного прогноза электрически опасных зон в облаках, не дающих разрядов, на основе применения методов и средств дистанционного зондирования атмосферы и в итоге определение предгрозового состояния облаков;

– разработка методических предложений по валидации данных и информационных продуктов космического комплекса гидрометеорологического назначения: «Метеор-М» №2 и других в части использования радиометрической аппаратуры СВЧ диапазона для температурно-влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА) и бортового радиолокационного комплекса (БРЛК);

– исследование влияния атмосферных процессов в ионосфере на состояние тропосферы (прежде всего на изменение электрического состояния);

– совершенствование радиолокационных критериев обнаружения опасных явлений погоды (ливень, гроза, град, шквал, смерч) на основе применения доплеровских поляризационных метеорологических радиолокаторов;

– исследования ионосферы с помощью ионозонда и параметров ветра в мезосфере с помощью средств радиолокации МК-31;

– мониторинг состояния атмосферы и ее загрязнения, включая исследование влияния мегаполиса Санкт-Петербурга.

Вывод. Получившая развитие на Северо-Западе Российской Федерации геофизическая обсерватория Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского выполняет функции методического центра по испытанию измерительных комплексов геофизического назначения, обеспечению учебного процесса подготовки специалистов, проведению научных исследований и решению прикладных задач геофизики.

Список используемых источников

1. *Щукин Г.Г.* Задачи, состояние и перспективы подспутниковых наблюдений // Сборник докладов. Берлин, АН ГДР. – Изд.: Природа, Интеркосмос, 1989. – С. 44–68.

2. Метеорологический полигон ВКА имени А.Ф. Можайского и его развитие / Г.Г. Щукин, Ю.В. Кулешов, И.А. Готюр и др. // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2016. – С. 156–161.

3. Валидация информационных продуктов спутниковых радиометров микроволнового диапазона / Д.М. Караваев, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин, А.Б. Успенский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т.11, № 3. – С. 259–267.

О.В. Григорьева*,
кандидат техн. наук;

Д.В. Жуков*;

А.В. Марков*,
кандидат техн. наук;

В.Ф. Мочалов*

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

ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ АКВАТОРИЙ В ЗОНАХ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В статье оценивается эффективность существующей системы производственного экологического контроля водных объектов, находящихся в зонах ответственности Вооруженных сил, и анализируются возможности ее совершенствования за счет внедрения современных методов и средств дистанционного зондирования Земли. Приводится описание разработанной совокупности спектральных признаков и решающих правил, последовательное применение которых позволяет при тематической обработке материалов аэрокосмической гиперспектральной съемки в автоматизированном режиме с высокой достоверностью идентифицировать типовые загрязнения акваторий.

Ключевые слова: производственный экологический контроль, аэрокосмическая гиперспектральная съемка, обработка данных дистанционного зондирования, спектральные признаки.

ВВЕДЕНИЕ

Морские акватории, находящиеся в зонах ответственности Вооруженных сил, относятся к одним из наиболее сложных объектов с точки зрения организации эффективного производственного экологического контроля (ПЭК) по причине наличия широкого спектра потенциальных источников экологически опасных воздействий, которые могут быть труднодоступны и распределены на значительной площади. В большинстве случаев эти акватории закреплены за воинскими частями, организациями и предприятиями Военно-морского флота (ВМФ), органы военного управления и должностные лица которого в своей природоохранной деятельности руководствуются «Правилами охраны природной среды в ВМФ» (ПОПС-90) [1]. Регламентированная этим документом система организации наблюдений за состоянием загрязнения моря ориентирована на применение визуальных методов контроля с берега, с борта кораблей или авианосителей. На ряде флотов к ПЭК привлекаются также специализированные экологические морские суда и катера, позволяющие производить локальные инструментальные измерения уровня загрязненности воды в местах забора проб. С 2004 года в Вооруженных силах эксплуатируется авиационный комплект экологического мониторинга АКЭМ-обзор, включающий в свой состав фотографическую и инфракрасную (ИК) аэросъемочную аппаратуру.

Объективный анализ возможностей указанных сил и средств свидетельствует о неспособности с их помощью обеспечить выявление, классификацию и определение количественных показателей вредных веществ (ВВ) в море одновременно и с высокой оперативностью, и с требуемой достоверностью. Одним из направлений решения этой проблемы является использование в интересах ПЭК данных аэрокосмической гиперспектральной съемки (ГСС), при обработке которых возможна надежная идентификация типовых загрязнений водных объектов в автоматизированном режиме.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТИПОВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АКВАТОРИЙ

Низкая эффективность береговых и судовых визуальных наблюдений, являющихся в ВМФ основным методом оценивания состояния загрязнения моря, обусловлена целым рядом причин, основной из которых является невозможность обеспечить таким способом контроль значительных по площади водных объектов. Инструментальные обследования с привлечением судовых измерительных комплексов связаны с существенными временными затратами и имеют локальный характер, что не позволяет получить объективную картину о степени загрязненности всей акватории.

Значительно лучшая оперативность обследования достигается при использовании авиационных средств. Однако высокая вариативность информативных признаков (формы, цвета, температурного контраста и др.) большинства привносимых в воду ВВ определяет сложность, а в ряде случаев и невозможность их классификации при визуальном наблюдении или с помощью штатной (входящей в комплект АКЭМ-обзор) фотографической и ИК аппаратуры. С этой же причиной связаны часто имеющие место при визуальном дешифрировании случаи «ложных тревог» – ошибочного отнесения к загрязнениям неоднородностей морской поверхности, вызванных естественными причинами. Например, тонкие белесовато-маслянистые нефтяные пятна на воде визуально схожи с пленками биогенного происхождения. Отражение облаков на водной поверхности может быть ошибочно идентифицировано как пленка нефтепродуктов (НП) серовато-стального цвета. Существенные сложности возникают при необходимости различить между собой участки водного объекта, содержащие минеральные взвеси, и зоны мелководья с песчаным дном. Кроме того, на фотографических и ИК снимках невозможна достоверная классификация типовых загрязнений в автоматическом режиме, что обуславливает значительную продолжительность процесса обработки данных, тем самым нивелируя выигрыш в оперативности, достигаемый за счет меньших временных затрат на сбор информации по сравнению с судовыми измерениями.

Отмеченные обстоятельства позволяют сделать вывод, что полную и оперативную информацию об экологической обстановке на больших по площади акваториях способны обеспечить только авиационные и космические средства, но для получения достоверных результатов идентификации загрязнений необходимо привлечение к обследованиям съемочной аппаратуры, обладающей более высокими информационными возможностями по сравнению с имеющимися штатными комплексами.

Вместе с тем анализ эффективности современных технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) показывает, что большинство традиционно используемых методов имеют существенные ограничения применительно к задаче идентификации (т. е. обнаружения и классификации) наиболее распространенных в водных объектах загрязнений, к которым относятся пленки НП и минеральные взвешенные вещества (МВВ).

Ограничения в использовании радиолокационных средств связаны с возможностью наблюдения только при определенных гидрометеорологических условиях и высокой вероятности ложных распознаваний. Нефтяные пятна ошибочно интерпретируются как области выглаживания поверхностного волнения, вызванные другими причинами: органическими пленками, судовыми разливами, штилевыми зонами, льдинами и др. [2]. Кроме того, по радиолокационным изображениям невозможно определение показателей, характеризующих интенсивность нефтяного загрязнения (массы или толщины пленки НП).

Методы тепловой съемки для обнаружения загрязнений используют при возникновении в зоне распространения ВВ изменения термодинамической температуры воды и, соответственно, радиационной температуры водной поверхности. Вместе с тем реализацию достоверной классификации загрязнений по тепловым аномалиям существенно затрудняет влияние на температурный режим водных объектов различных внешних факторов [3]. Радиаци-

онный контраст нефтяного пятна и воды может изменяться в широких пределах и зависит не только от толщины пленки, но и в не меньшей степени от гидрометеоусловий. В течение суток радиационный контраст может быть как положительным, так и отрицательным, а в отдельных случаях может равняться нулю.

Основное преимущество лазерных систем ДЗЗ заключается в возможности определения количественных показателей интенсивности нефтяных загрязнений [4]. Однако практическое использование данной аппаратуры сопряжено со значительными трудностями ввиду ее сложности, высокой стоимости, а также низкой производительности, обусловленной необходимостью выполнения съемки с малых высот.

Отличительной особенностью аэрокосмических много- и гиперспектральных оптико-электронных средств является их способность анализировать спектральные характеристики (СХ) объектов интереса, что позволяет в ряде случаев обнаруживать цели, которые имеют малые яркостные контрасты в широком спектральном интервале и не дешифрируются на панхроматических снимках.

Методы многоспектральной съемки, реализующие синхронную регистрацию изображений в нескольких (как правило, до 20) спектральных полосах шириной от 20 нм, обеспечивают достаточно уверенное обнаружение различных загрязнений акваторий, но не позволяют достоверно решать задачи определения толщины нефтяных пленок, а также селекции НП и МВВ от сопутствующих им «ложных целей» [зон развития фитопланктона (ФП) и участков мелководья], так как имеющиеся отличия в СХ этих маскирующих друг друга объектов столь незначительны, что могут быть выявлены только в еще более узких полосах спектра (менее 10 нм).

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА АКВАТОРИЯХ

Основной причиной, определяющей низкую эффективность известных методов автоматизированной тематической обработки данных ГСС (за исключением отдельных моделей, имеющих исключительно региональный характер) в интересах идентификации ВВ в водных объектах [5], является недостаточное физическое обоснование информативных спектральных признаков, используемых при дешифрировании, и, как следствие, неустойчивость разработанных алгоритмов к изменениям условий наблюдения.

Для решения названной проблемы специалистами Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского был проведен цикл теоретических и экспериментальных исследований особенностей СХ типовых загрязнений акваторий [6, 7], в результате которых была сформирована система спектральных признаков (табл. 1), последовательное применение которых позволяет на гиперспектральных изображениях выделить водную поверхность, обнаружить и отсементировать от «ложных целей» пленки НП и МВВ, а также разделить пленки НП по интенсивности на пять классов в соответствии с требованиями нормативных документов [8].

Созданный научно-методический аппарат был верифицирован по данным специально организованных экологических обследований объектов Северного и Черноморского флотов. Авиационные измерения спектральных сигнатур чистых и загрязненных участков акватории выполнялись с борта самолета Ан-30 с помощью видеоспектрометров «Фрегат» (спектральное разрешение 5 нм, спектральный диапазон 480–950 нм) и «Лептон» (спектральное разрешение 0,4–13 нм, спектральный диапазон 402–1031 нм).

По результатам обследований были выявлены многочисленные факты загрязнений акваторий пленками НП и МВВ. Сравнение результатов идентификации ВВ, полученных при автоматизированной обработке материалов ГСС, и данных визуального дешифрирования синхронно зарегистрированных цветных аэрофотоснимков свидетельствует о существенно более высокой достоверности первого подхода.

Таблица 1

Информативные спектральные признаки для автоматизированной идентификации типовых загрязнений акваторий при обработке данных ГСС

Объекты интереса	Признаки (решающие правила)	Этапы обработки
Водная поверхность, береговая черта	$d_1 = \frac{r^0_{730-980} - r^B_{730-980}}{r^0_{730-980} + r^B_{730-980}} < 0,8$	Селекция водной поверхности от береговой растительности и грунта (песка, гальки и т.п.)
	$d_1 < 0,5$ и $d_2 = \frac{r^0_{590-710} - r^B_{590-710}}{r^0_{590-710} + r^B_{590-710}} < 0,7$	Селекция водной поверхности от скальных горных пород
Пленки НП	$d_3 = \frac{r^0_{550-550} - r^B_{550-550}}{r^0_{500-550} + r^B_{500-550}} > 0,16$	Обнаружение пленок НП всех классов (возможно обнаружение «ложной цели» – ФП)
	$d_1 > 0,6$	Классификация пленок класса 5
МВВ	$d_4 = \lambda_{r \max} \in [590; 710]$ нм	Обнаружение МВВ (возможно обнаружение «ложных целей» – зон мелководья)
МВВ, мелководье	$d_5 = r(\lambda_{580-600})' < 0$	Селекция МВВ от зон мелководья
Пленки НП	$d_6 = \frac{r^0_{440-450} - r^B_{440-450}}{r^0_{440-450} + r^B_{440-450}} < 0,2$	Разделение пленок НП классов 1-2 (с ФП) и пленок НП классов 3-4
Пленки НП, ФП	$d_7 = \frac{r_{\max(500-550)}}{r_{440-450}} < 1$	Селекция НП классов 1-2 от ФП
Пленки НП	$d_8 = \frac{r^0_{750-850} - r^B_{750-850}}{r^0_{750-850} + r^B_{750-850}} < 0,35$	Классификация пленок НП классов 1 и 2
	$d_9 = r_{\text{appr}}(\lambda_{440-650})' \in [-0,04; -0,01]$ мкм ⁻¹	Классификация пленок НП классов 3 и 4

Примечание. В таблице используются следующие обозначения: $r^0_{\lambda_1-\lambda_2}$, $r^B_{\lambda_1-\lambda_2}$ – коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) анализируемого на гиперспектральном изображении объекта и водной поверхности в интервале длин волн $\lambda_1 \dots \lambda_2$ [нм]; $\lambda_{r \max}$ – длина волны, на которой находится максимум КСЯ в рассматриваемом интервале спектра; $r_{\text{appr}}(\lambda_{440-650})'$ – производная линейно аппроксимированной на интервале 440–650 нм функции КСЯ.

При его использовании процент правильно классифицированных элементов гиперспектральных изображений от общего количества проверяемых элементов составил более 90 % для всех объектов интереса, как это видно из анализа представленной в табл. 2 «матрицы ошибок», традиционно применяемой для исследования эффективности математических процедур обработки данных ГСС. В диагональных ячейках этой матрицы приведена площадь (в км²) корректно опознанных объектов, вне диагонали – ошибочно. Важно отметить, что наряду с повышением достоверности за счет автоматизации процесса дешифрирования более чем в три раза были сокращены временные затраты на анализ аэросъемочных материалов.

Таблица 2

Матрица ошибок идентификации типовых загрязнений акваторий при обработке материалов гиперспектральной и фотографической съемки

Объект интереса	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	Достоверность
Результаты автоматизированной обработки данных ГСС										
Пленки НП 1 класс (1)	1,688	0,071	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,033	0,93
Пленки НП 2 класс (2)	0,065	1,558	0,010	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,021	0,94

Окончание табл. 2

Объект интереса	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	Достоверность
Результаты автоматизированной обработки данных ГСС										
Пленки НП 3 класс (3)	0,000	0,007	2,964	0,065	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,98
Пленки НП 4 класс (4)	0,000	0,000	0,046	0,675	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,94
Пленки НП 5 класс (5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,000	0,001	0,000	0,000	0,97
ФП (6)	0,005	0,002	0,000	0,000	0,000	0,136	0,000	0,000	0,000	0,95
МВВ (7)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,033	0,003	0,000	0,90
Мелководье (8)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,028	0,000	0,94
Морская вода (9)	0,023	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	17,254	1,00
Результаты визуального дешифрирования цветных аэрофотоснимков										
Пленки НП 1 класс (1)	1,431	0,127	0,000	0,000	0,000	0,029	0,000	0,000	0,221	0,79
Пленки НП 2 класс (2)	0,215	1,341	0,069	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,028	0,81
Пленки НП 3 класс (3)	0,000	0,017	2,398	0,622	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,79
Пленки НП 4 класс (4)	0,000	0,000	0,151	0,570	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,79
Пленки НП 5 класс (5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,000	0,009	0,000	0,000	0,77
ФП (6)	0,042	0,003	0,000	0,000	0,000	0,098	0,000	0,000	0,000	0,69
МВВ (7)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,029	0,006	0,000	0,80
Мелководье (8)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,019	0,000	0,65
Морская вода (9)	0,030	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	17,243	1,00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования свидетельствуют, что использование материалов ГСС обеспечивает повышение достоверности идентификации типовых ВВ в водных объектах примерно на 20 % в сопоставлении с результатами, которые могут быть получены с помощью штатных авиационных средств, привлекаемых в настоящее время в Вооруженных силах к ПЭК. При этом существенно (в разы) меньшими являются временные затраты на обработку данных контроля по сравнению с визуальным дешифрированием.

Полученные результаты и положительный опыт их использования военными экологами Северного и Черноморского флотов позволяют считать перспективным направлением совершенствования существующей системы ПЭК внедрение в деятельность органов экологической безопасности технологий обработки материалов аэрокосмической съемки, в том числе гиперспектральной, для информационной поддержки мероприятий, связанных с контролем соблюдения природоохранных требований на подведомственных военных объектах.

Список используемых источников

1. Правила охраны природной среды в ВМФ (ПОПС-90). – М.: Воениздат, 1993. – 184 с.
2. Ивонин Д., Иванов А. Новый метод обработки и анализа радиолокационных поляризованных данных применительно к задаче идентификации и классификации пленочных загрязнений моря // Земля из космоса. – 2016. – № 6(22). – С. 39–45.
3. Метод и аппаратура дистанционного обнаружения, распознавания и количественного анализа разливов нефти на морской поверхности / Г.С. Мельников, В.М. Самков, Б.С. Товбин, О.А. Дерин // Оптический журнал. – 2013. – № 6(80). – С. 36–42.

4. *Городничев В.А., Белов М.Л., Кувшинов А.В.* Дистанционный лазерный четырехволновой метод измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности // *Инженерный журнал: наука и инновации.* – 2015. – Вып. 2.

5. *Fingas M., Brown C.* Review of oil spill remote sensing // *Marine Pollution Bulletin.* – 2014. – № 83. – P. 9–23.

6. *Жуков Д.В.* Спектральные признаки для идентификации типовых загрязнений акваторий морей по данным авиационной и космической съемки // *Оптика атмосферы и океана.* – 2016. – Т. 29, № 07. – С. 560–565.

7. Методика оценивания эколого-экономического ущерба водным объектам по данным дистанционного зондирования Земли / О.В. Григорьева, Д.В. Жуков, А.В. Марков, В.Ф. Мочалов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 233–244.

8. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства: приказ Минприроды России от 13.04.2009 г. № 87 (ред. от 26.08.2015 г.). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_88197 (дата обращения: 12.03.2018).

А.П. Доронин*,
доктор техн. наук, профессор;

Н.А. Козлова*;

В.М. Петроченко*,
кандидат техн. наук, доцент;

Н.Б. Толстоброва*

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

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В МЕСТАХ КРУПНЫХ АВАРИЙ И ПОЖАРОВ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ И ТУМАНОВ

В публикации рассматриваются физические основы и техническая реализуемость метода локализации выбросов вредных веществ в местах крупных аварий и пожаров в населенных пунктах с помощью искусственных облаков и туманов.

Ключевые слова: загрязнение, химические реагенты, искусственные туманы, искусственные облака.

Загрязнение воздушных бассейнов городов (или их отдельных районов) может быть вызвано не только выбросами загрязняющих веществ промышленными предприятиями или автотранспортом, но также и авариями на нефтехимических и перерабатывающих производствах, складах, в больших торгово-развлекательных комплексах, в результате пожаров на несанкционированных свалках вблизи населенных пунктов (в тех случаях, когда ветер со свалок дует в направлении города). В связи с этим возникает необходимость в оперативной локализации выбросов загрязняющих веществ в районе места аварии (пожара) и вблизи него.

Следует отметить, что в последние годы для существенного улучшения экологической обстановки в крупных городах предлагается осуществлять искусственное рассеяние над ними внутримассовых слоистых, слоисто-кучевых облаков [1], а также вызывать из них искусственные или интенсифицировать естественные осадки [2]. При этом воздействие может осуществляться на значительной площади (сотни – тысячи квадратных километров).

В настоящей работе предлагается метод локализации выбросов вредных веществ на площади в несколько квадратных километров (например, в случае аварий на промышленных предприятиях, пожаров и др.) с помощью искусственных облаков и туманов (ИОТ).

Физические основы методов создания ИОТ основываются на следующем [3]:

а) способности ряда химических веществ поглощать водяной пар из атмосферы при относительной влажности воздуха менее 100 % (это гигроскопические вещества, например, поваренная соль, хлористый кальций и др.);

б) наличии в атмосфере слоев, в которых пересыщение водяного пара меньше пересыщения над водой, но больше пересыщения надо льдом;

в) наличии в атмосфере вертикальной неустойчивости.

Анализ работ в области модифицирования атмосферных условий позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время представляется возможным создание следующих видов ИОТ (рис.1) [4]:

- искусственные перистые кристаллические облака;
- искусственные конвективные облака;
- искусственные волнистообразные облака;
- искусственные туманы;
- искусственные низковысотные водно-аэрозольные образования.



Рис. 1. Методы создания искусственных облаков и туманов

Следует отметить, что для создания каждого вида искусственного атмосферного образования могут использоваться определенные методы. Вместе с тем в ряде случаев разные виды ИОТ могут быть созданы при использовании одного и того же метода. Например, путем диспергирования водных растворов гигроскопических реагентов представляется возможным создание как волнистообразных облаков, так и туманов.

Из анализа данных, приведенных на рисунке, можно заключить, что применительно к решению задачи локализации выбросов вредных веществ на площади в несколько квадратных километров целесообразно использование методов и соответствующих технических средств, позволяющих осуществлять создание искусственных туманов и низких волнистообразных облаков. Необходимо указать, что по температурным признакам применительно к проблеме модифицирования облаков и туманов последние подразделяются на «теплые» (наблюдаются при положительных значениях температуры воздуха) и «переохлажденные» или «холодные» (наблюдаются при отрицательных значениях температуры воздуха). Очевидно, что «теплые» облака и туманы состоят только из капель воды, а «холодные» облака и туманы могут быть по фазовому состоянию как капельными, так и смешанными, т. е. состоять из капель воды и ледяных частиц одновременно.

Кристаллические облака и туманы, состоящие только из ледяных частиц и наблюдающиеся при отрицательной температуре воздуха, составляют отдельный класс облаков и не относятся к переохлажденным («холодным») атмосферным образованиям.

Подразделение облаков и туманов на «теплые» и «холодные» обусловило необходимость разработки соответствующих методов и средств (как химических, так и технических) для воздействия на них. Так, например, для воздействия на «теплые» облака и туманы широкое применение нашли гигроскопические реагенты (в частности, поваренная соль, хлористый кальций, мочеви́на, аммиачная селитра и др.), водные растворы этих гигроскопических реагентов либо водные растворы смесей этих веществ, смешанных в определенных концентрациях.

Для воздействия на «холодные» облака и туманы в практике работ широкое применение нашли такие льдообразующие реагенты, как [3]:

- хладореагенты (твердая уголекислота, жидкий пропан);
- кристаллизующие вещества [йодистое серебро (Ag), сернистая медь (CuS)];
- кристаллогидраты газов (пропан).

Практика работ по созданию ИОТ показала, что на современном этапе представляется возможность создания главным образом «теплых» и кристаллических волнистообразных облаков и туманов. В качестве средств доставки и диспергирования химических реагентов (ХР) для создания искусственных туманов (ИТУМ) могут быть использованы специальные наземные средства, представляющие собой сопло отработавшего свой ресурс авиационного (реактивного) двигателя, установленного на шасси грузового автомобиля (например, УРАЛ-375, КАМАЗ и др.), и аналогичные тем, что используются в настоящее время в войсках РХБ защиты.

Подача раствора химического реагента в сопло двигателя может осуществляться либо из емкости, расположенной непосредственно на том же автомобиле, на котором установлен авиационный двигатель, либо из емкости, размещенной на другом автомобиле. При использовании такого двигателя длина зоны искусственного тумана может составлять порядка 4–5 км, а ширина около 300–500 м на расстоянии порядка 400–500 м от сопла двигателя (через 15–20 сек). При этом высота верхней границы искусственного тумана может достигать 200–300 м. Следовательно, одновременно создаваемый объем искусственного тумана при средних значениях его характеристик может составить $4500 \text{ м} \times 400 \text{ м} \times 250 \text{ м} = 4,5 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ или $0,45 \text{ км}^3$. Закрываема ИТУМ площадь будет равна $4500 \text{ м} \times 400 \text{ м} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ или $1,8 \text{ км}^2$.

При создании ИТУМ с помощью раствора гигроскопических реагентов (например, мочевины) в атмосфере с относительной влажностью воздуха больше точки гигроскопичности ХР (например, больше 80 %) искусственно созданный туман будет существовать, смещаясь по направлению ветра, в течение длительного времени (десятки минут – часы). Следовательно, например, при скорости ветра 5 м/с (18 км/ч) и работе двигателя в течение часа площадь закрытия ИТУМ будет составлять $18 \text{ км/ч} \times 1 \text{ ч} \times 0,5 \text{ км} = 9 \text{ км}^2$. Поскольку ИТУМ, созданный в течение часа, будет иметь площадь, равную 9 км^2 , то вследствие того, что он может существовать длительное время в атмосфере (вплоть до нескольких часов), то общая площадь, закрытая туманом, будет значительно больше. При работе установки в течение нескольких часов закрываемая ИТУМ площадь будет гораздо больше площади зоны тумана, созданной в течение часа. При использовании нескольких таких установок и увеличении времени их работы закрываемая ИТУМ площадь будет также увеличиваться в линейной зависимости.

Кроме авиационных двигателей можно использовать специальные тепловые машины с установленными на них емкостями для приготовления и хранения растворов химических реагентов и генераторами, позволяющими осуществлять возгонку подаваемого в генератор раствора. В этом случае площадь и объем создаваемого тумана будет меньше, чем при использовании авиационного двигателя. Так, длина зоны ИТУМ может составлять (в зависимости от типа генератора и его производительности) от 400 до 1000 м, ширина – от 200 до 300 м, а вертикальная протяженность – от 30 до 80–100 м. Соответственно, площади зон, покрытые ИТУМ, будут составлять при одновременном его создании (в течение 15–20 сек) в среднем $S_{\text{ИТУМ}} = 700 \text{ м} \times 250 \text{ м} = 1,75 \cdot 10^5 \text{ м}^2$. При скорости ветра порядка 5 м/с (18 км/ч) и времени работы генератора, равному одному часу, площадь зоны искусственного тумана будет порядка $S_{\text{ИТУМ}} = 18 \text{ км/ч} \times 1 \text{ ч} \times 0,25 \text{ км} = 4,5 \text{ км}^2$.

При значениях относительной влажности воздуха более 80 % и более длительном времени работы генератора площадь зоны, закрытой ИТУМ, будет составлять больше 10 км^2 .

Для создания ИТУМ в холодное полугодие (при значениях температуры воздуха ниже 0°C) в качестве ХР могут быть использованы водные растворы кристаллизующих реагентов (например, водный раствор йодистого серебра).

При низких значениях температуры воздуха, ниже минус $28\text{--}29^{\circ}\text{C}$, создание ИТУМ возможно (в силу физических основ образования ледяных частиц в атмосфере) при использовании в качестве ХР обычной воды, подогретой до температуры $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$ для исключения ее замерзания.

Образующиеся при диспергировании водных растворов кристаллизующих реагентов или воды ледяные частицы быстро растут в условиях значительного пересыщения водяного пара по отношению ко льду до размеров снежинок с последующим захватом ими частиц загрязняющих веществ и выпадением на подстилающую поверхность.

Положительный эффект создания ИТУМ для снижения концентрации загрязняющих веществ основывается на известном факте уменьшения концентрации вредных примесей в атмосфере за счет их коагуляции с частицами осадков (каплями воды, кристаллами льда и снежинками). Можно полагать, что за счет создания ИТУМ время снижения концентрации вредных примесей и масштабы загрязнения атмосферного воздуха над районами аварий, пожаров и за их пределами могут быть сокращены (по сравнению с естественными условиями) в несколько раз. Возможность создания ИТУМ с помощью специальных тепловых машин подтверждены на практике натурными экспериментами [4].

В случае наличия в атмосфере задерживающих слоев (инверсий) до высот $200\text{--}300\text{ м}$ возможно использование указанных тепловых машин с авиационным двигателем также и для создания низких волнообразных облаков. Созданные с помощью наземных установок такие облака также могут способствовать, за счет описанного выше механизма, уменьшению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере населенных пунктов.

Для создания волнистообразных облаков на значительной площади (десятки квадратных километров) целесообразно использование самолетов типа АН-30, АН-26, АН-12 и вертолетов с установленными на их борту специальными емкостями или генераторами и установками для диспергирования воды и растворов кристаллизующих и гигроскопических реагентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемый в настоящей работе метод снижения концентрации загрязняющих веществ над районами крупных аварий, пожаров и прочего и за их пределами может считаться перспективным по следующим причинам: во-первых, он может оперативно применяться в зависимости от типа используемых технических средств доставки и диспергирования химических реагентов на различных площадях (от 1 км^2 до нескольких десятков квадратных километров); во-вторых, для этого имеются в наличии соответствующие химические реагенты; в-третьих, предлагаемый метод является экономически выгодным; в-четвертых, данный метод расширяет арсенал средств по решению проблемы, связанной со снижением уровня концентрации вредных веществ в районах крупных техногенных аварий, пожаров и за их пределами.

Практическая реализация предлагаемого метода, несомненно, связана с проведением дополнительных исследований, прежде всего синоптико-климатического и технико-экономического плана, в конкретных физико-географических районах страны.

Список используемых источников

1. Метод очищения воздушных бассейнов крупных городов от загрязняющих примесей путем рассеяния облаков / А.П. Доронин, О.И. Дидык, С.А. Шмалько, К.О. Фролов // Сбор-

ник научных трудов участников межвузовского научно-практического семинара «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства» 17 апреля 2014 г., г. Санкт-Петербург / под общ. ред. доктора техн. наук, проф. А.П. Бирюкова. – СПб.: ВА МТО, 2014. – С. 88–93.

2. Метод очищения воздушных бассейнов крупных городов от загрязняющих примесей путем вызывания искусственных осадков из переохлажденных внутримассовых слоистообразных объектов / А.П. Доронин, В.М. Петроченко, Н.А. Козлова, С.А. Шмалько // Сборник научных трудов участников межвузовского научно-практического семинара «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства» 16 апреля 2015 г., г. Санкт-Петербург / под общ. ред. доктора техн. наук, проф. А.П. Бирюкова. – СПб.: ВА МТО, 2015. – С. 69–74.

3. *Доронин А.П.* Воздействия на атмосферные процессы и явления: учеб. пособие. – СПб., 2014. – 293 с.

4. Искусственные облака и туманы как перспективное средство решения хозяйственных и экологических задач / А.П. Доронин, Ю.В. Кулешов, В.М. Петроченко, Г.Г. Щукин // Доклады на Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 21–27 октября 2017 года, Нальчик: сборник научных трудов. – Уфа: АЭСТЕРНА, 2017. – Ч.2. – С. 141–149.

А.Е. Дроздов*,
кандидат техн. наук;

Н.Н. Жильцов*;

В.П. Свиридов*

* АО «ГНИНГИ», г. Санкт-Петербург

АВТОНОМНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОЙ ОКЕАНОЛОГИИ

Рассмотрено современное состояние и перспективы развития автономных комплексов контактных измерений океанографических параметров как составной части системы оперативной океанологии. Показаны предложения по созданию отечественной подсистемы наблюдений и измерений.

Ключевые слова: гидрофизические параметры, контактные измерения, оперативная океанология, теряемый зонд.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в ряде передовых и развивающихся стран наблюдается значительная активизация работ, связанных с созданием и совершенствованием систем оперативной океанологии [1].

Основными предпосылками для разработки подобных систем явились современные научно-технические достижения в области развития автономных комплексов контактных измерений гидрометеорологических параметров, средств зондирования океана из космоса и средств космической связи, высоко производительных программно-аппаратных средств обработки, накопления и усвоения информации о среде, а также численных моделей циркуляции океана и методов ассимиляции полученных данных.

На практике системы оперативной океанологии представляют собой системы мониторинга, обеспечивающие целенаправленную систематическую деятельность по выполнению регулярных измерений гидрометеорологических параметров, характеризующих состояние океана и атмосферы, а также последующую обработку полученных данных, позволяющую оценивать текущее и прогнозировать ожидаемое состояние гидрофизических полей океана преимущественно мезомасштабной изменчивости. К таким полям в первую очередь относятся поля температуры, течений, скорости звука, солености и плотности морской воды.

Каждая система оперативной океанологии (СООк) гидрофизических полей технологически включает четыре основных подсистемы: подсистему наблюдений и измерений; подсистему сбора, обработки и прогнозирования среды; подсистему оценки влияния среды на силы и средства; подсистему выработки рекомендаций в решения и доведения информации до потребителя.

В данной публикации остановимся на более подробном рассмотрении подсистемы наблюдений и измерений, объединяющей:

– технические средства контактных измерений, в состав которых входят буи различного назначения (якорные, дрейфующие – поверхностные, профиломеры и т. п.), а также судовые и авиационные средства вертикального зондирования океана;

– технические средства дистанционных измерений, включающие средства зондирования океана из космоса, обеспечивающие системы диагноза и прогноза спутниковыми альтиметрическими наблюдениями топографии поверхности океана, данными приводного ветра, волнения, температуры воды и цвета моря. Для полярных районов важной характеристикой, наблюдаемой с ИСЗ, является состояние ледового покрова.

ЗАРУБЕЖНЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Разработка, изготовление и последующее функционирование современных глобальных систем оперативной океанологии требует чрезвычайно больших финансовых и материальных затрат и поэтому осуществляется в рамках международных программ и проектов, таких как ГЕО, ГЕОСС, ГООС, Коперникус и др.

К настоящему времени общее количество измерительных средств, входящих в состав наблюдательной сети, может достигать 5500–8000 шт. Ежегодно для поддержания работоспособности системы предполагается установка не менее 700 новых буёв.

В состав сети входят:

- профилирующие буи по проекту «Арго» (более 3500 шт.), производящие вертикальные разрезы в океане;
- поверхностные дрейфующие буи (примерно 1500 шт.);
- якорные буи (не менее 100 шт.);
- ледовые буи (до 100 буёв);
- разовые (теряемые) зонды для выполнения судовых попутных наблюдений.

Профилирующие буи по проекту «Арго» предназначены для изучения глубоководных течений, а также вертикального зондирования для измерения распределения солёности и температуры воды. Работа буя в основном осуществляется по 10-дневному циклу. После передачи данных, которая занимает примерно 6–12 ч, буй погружается на глубину 1000 м. За счет встроенного механизма управления плавучестью буй уравнивается на этой глубине, где и дрейфует в течение 9 дней. Перед всплытием на поверхность буй погружается на глубину 2000 м, затем начинает всплытие и выполнение измерений. После всплытия буй осуществляет передачу данных, по окончании которой цикл повторяется. Ориентировочная стоимость такого буя составляет 20 тыс. \$ США [2].

Следует отметить, что в последние годы за рубежом появились модификации автономных дрейфующих зондирующих буёв типа «SLOCUM» (США). С помощью этих буёв исследуются глубинные течения, положения слоя скачка, внутренние волны, распределение скорости звука по глубине, положение звуковых каналов и другие характеристики, которые раньше можно было получить только зондированием с борта судна, и то не в полном объеме, и с неизмеримо большими финансовыми затратами.

Такие буи получают всё более широкое распространение благодаря их высокой эффективности и относительно низкой стоимости (≈ 8 тыс. \$ США). Зондирование по глубине со скоростью ≈ 1000 м в сутки осуществляется без затрат энергии батарейных источников, за счет использования разности температур глубинных и поверхностных слоев (термическая стратификация воды). В качестве рабочего тела, изменяющего объем и плавучесть буя, используется парафиноподобная смесь, затвердевающая с изменением объема при температуре $+10^\circ\text{C}$. Технология парафинового движителя является предметом «ноу-хау» производителя.

Наиболее широко известный и применяемый на практике типоряд поверхностных дрейфующих буев разработан в ФБГУН МГИ РАН и ООО «Марлин-юг», г. Севастополь [3].

Поверхностные дрейфующие буи способны обеспечить измерение наиболее значимых гидрометеорологических параметров, в том числе в полярных и приполярных районах.

Информационно-измерительные возможности дрейфующих поверхностных буёв при приемлемой стоимости определили их место в системе наблюдений как одного из массовых средств оперативного мониторинга деятельного слоя океана, динамики ледовых полей и приводной атмосферы.

Для производства попутных судовых измерений наиболее часто используются обрывные (теряемые) гидрологические зонды типа ХВТ для определения вертикального распределения температуры морской воды по глубине и ХСТД для определения вертикального распределения температуры, электрической проводимости и давления. В ходе проведения исследований измеряемые параметры передаются от датчиков свободно падающего зонда через тонкую

(0,15 мм) проволоку на бортовое устройство. Для определения вертикального распределения гидрофизических параметров с использованием авиации применяются теряемые зонды типа AXCTD, AXSV AXCP, позволяющие получать профили температуры, скорости звука и скорости течений соответственно.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ

Результаты, полученные в ряде работ [4-8], подтверждают необходимость создания отечественной функциональной системы оперативной океанологии (ССОк), предполагающей достижение современного уровня информационного обеспечения управления силами и средствами ВС РФ, повышение эффективности решения задач освещения подводной обстановки путем автоматизации процессов наблюдений, оперативного контроля, моделирования и прогнозирования гидрофизических полей мезомасштабного уровня изменчивости на океанских (морских) театрах военных действий (ТВД).

Очевидно, что для создания отечественной системы ССОк, предназначенной для решения специализированных задач обеспечения ВМФ, целесообразно использовать методические подходы и технические решения, позволяющие в значительной степени снизить сопутствующие материальные и финансовые затраты. Учитывая слабость отечественной спутниковой компоненты, поставленная цель может быть достигнута, если вместо выполнения регулярных измерений (мониторинга), используемых в глобальных системах оперативной океанологии, в данном случае будет реализована методика вскрытия гидрофизических параметров в относительно ограниченных, оперативно важных районах Мирового океана, осуществляемая путем подробной синхронной съемки гидрофизических полей с использованием значительного количества одноразовых, теряемых зондов с авиационных или корабельных носителей.

Следует подчеркнуть, что использование подобных систем вскрытия гидрофизических параметров предусматривает необходимость применения соответствующих численных моделей обработки получаемой информации. Примером таких моделей являются модели, разработанные сотрудниками ИБРАЭ РАН и ФБГУН МГИ РАН [4-8]. Основные требования к результатам глубоководных измерений, выполняемых с использованием теряемых зондов, для последующей ассимиляции (усвоения) численными моделями морской среды приведены в табл.1.

Таблица 1

Требования к результатам измерений гидрофизических параметров

№ п/п	Наименование	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности при P=0,95
1	Температура морской воды, °C	от -2 до 35	± 0,01
2	Соленость, промилле (PSU)	от 10 до 37	± 0,01
3	Глубина, м	от 1 до 1000	± 1
4	Баротропная придонная скорость течения, м/с	от 0 до 1	± 0,02
5	Направление придонного течения, град	от 0 до 360	± 10
6	Горизонтальное разрешение съемки, км	3	-
7	Минимальный размер района съемки, км ²	10000	-

Таким образом, в качестве базового измерителя гидрофизических величин, характеризующих процессы мезомасштабной изменчивости, необходимо использовать свободно падающие теряемые зонды, предназначенные для измерения температуры, электропроводности,

скорости звука в морской воде, гидростатического давления, а также скорости и направления течений.

В ходе выполнения измерений теряемый зонд должен погружаться на заданную глубину с попутным измерением гидрофизических параметров и позиционированием у дна для измерений параметров придонного течения. После выполнения цикла измерений зонд всплывает на поверхность и передает измеренные параметры на носитель (самолет, корабль, спутник).

Требования к метрологическим характеристикам указанной аппаратуры определяются с учетом современного уровня развития технических средств измерения параметров мезоструктуры в океане, равновесного вноса погрешностей, непосредственно измеряемых гидрофизических элементов с учетом параметров, измеряемых косвенно, а также требований численных моделей, используемых в подсистеме обработки и прогнозирования среды (табл. 2) [9].

В ходе создания подобной аппаратуры целесообразно максимально использовать существующие технические решения по массогабаритным характеристикам приборов, размещаемых на подвесных устройствах, по характеристикам каналов связи, применяемых при серийном выпуске оборудования для ВМФ.

Таблица 2

Метрологические характеристики измерительных комплексов

№ п/п	Наименование измеряемой характеристики и единица измерений	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности при $P=0,95$
1	Температура морской воды, °С	от -2,5 до 35	$\pm 0,01$
2	Электропроводность, отн. ед.	от 0 до 1,6	$\pm 0,0015$
3	Скорость звука в воде, м/с	от 1402 до 1560	$\pm 0,5$
4	Гидростатическое давление, МПа	от 0 до 20	$\pm 0,01$
5	Скорость течения V , м/с	от 0,02 до 1,5	$\pm(0,02+0,5V)$
6	Направление течения, град	от 0 до 360	± 5

В частности, теряемые зонды с авиационной и корабельной постановкой могут быть изготовлены в массогабаритных характеристиках, аналогичных радиогидроакустическим буям, широко применяемым в ВМФ.

Указанными зондами, размещенными в соответствующих кассетах, могут комплектоваться корабли и суда ВМФ, а также дрейфующие, якорные и ледовые буи. Таким образом обеспечивается создание унифицированного средства для получения данных о мезомасштабной изменчивости гидрофизических полей Мирового океана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия в ряде передовых и развивающихся стран наблюдается значительная активизация работ, связанных с созданием и совершенствованием систем оперативной океанологии.

Разработка, изготовление и поддержание работоспособности современных глобальных систем оперативной океанологии требует чрезвычайно больших финансовых и материальных затрат и поэтому осуществляется в рамках международных программ и проектов.

Для создания отечественной системы оперативной океанологии, предназначенной для решения специализированных задач обеспечения ВМФ, целесообразно использовать методику вскрытия океанологической обстановки в относительно ограниченных, оперативно важных

районах Мирового океана. Такая методика заключается в подробной синхронной съемке гидрофизических полей с использованием значительного количества одноразовых теряемых зондов авиационного или корабельного базирования.

В качестве базовых измерителей гидрофизических величин, характеризующих процессы мезомасштабной изменчивости, целесообразно использовать свободно падающие теряемые зонды, обеспечивающие измерения температуры, электропроводности, скорости звука в морской воде, гидростатического давления, а также скорости и направления течений.

Требования к метрологическим характеристикам указанной аппаратуры определяются с учетом современного уровня развития технических средств определения параметров мезоструктуры в океане, равновесного вноса погрешностей, непосредственно измеряемых гидрофизических элементов, с учетом параметров, измеряемых косвенно, а также требований численных моделей, используемых в подсистеме обработки и прогнозирования среды.

Список используемых источников

1. *Зеньков А.Ф., Мاستрюков С.И.* Состояние и тенденции развития систем оперативной океанологии в ВМС зарубежных стран // *Навигация и гидрография.* – 2016. – № 45. – С. 69–76.
2. *Морские исследования России.* – URL: <http://ocean.extech.ru/ioc/programs/argo.php> (дата обращения: 01.05.2018).
3. ООО «Марлин-Юг» Каталог продукции. – URL: https://marlin-yug.com/assets/files/pdf_ru/marlin-yug_product_catalog_ru.pdf (дата обращения: 01.05.2018).
4. *Саркисян А.С., Сеидов Д.Г., Семёнов Е.В.* Численная модель океанских течений синоптического масштаба // *Океанология. Физика моря.* – 1978. – Т. XVIII, вып.1. – С. 5–10.
5. *Тимченко И.Е.* Динамико-стохастические модели состояния океана. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 192 с.
6. *Семёнов Е.В.* Состояние и развитие гидродинамических моделей океана // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика: сборник научных трудов.* – 2008. – С. 48–62.
7. *Семёнов Е.В.* Состояние и развитие гидродинамических моделей в интересах ВМФ. – М.: ОИ РАН, 2008. – 32 с.
8. *Коротаев Г.К. Еремеев* Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2006. – 282 с.
9. Оперативное определение параметров мезоструктуры в океане / А.Т. Шевцов, А.Е. Дроздов, В.М. Кушнир, Г.В. Смирнов. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1988. – 50 с.

А.Н. Ефременко**,

кандидат техн. наук;

Н.О. Моисеева**,

кандидат техн. наук;

В.В. Чёрный*,

кандидат техн. наук, доцент

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

** СПГУГА, г. Санкт-Петербург

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В ИНТЕРЕСАХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЙСК

В публикации рассматривается содержание метода автоматизированного контроля дождевых паводков в приграничных и трансграничных регионах Российской Федерации. Контроль дождевых паводков реализован в макете автоматизированного программно-технического комплекса (АПТК) и протестирован на данных гидрологических постов реки Усури – притоке Амура, где в июле-сентябре 2013 года наблюдалось катастрофическое наводнение, вызванное длительными ливневыми дождями. Для контроля дождевых паводков предлагается упрощенный вариант методики, применяемой при расчете параметров дождевых паводков с малых водосборов и используемый при проектировании дорог и пропускных сооружений.

Ключевые слова: дождевые паводки, метод контроля, морфометрические характеристики бассейна, автоматизированный программно-технический комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ расположения гидрологических объектов, форм рельефа, характерных климатических и гидрометеорологических условий по территории РФ позволяет выделить ряд приграничных и трансграничных районов, в которых может возникнуть угроза инициирования опасных гидрологических и склоновых процессов. Причем такие процессы не только могут быть замаскированы под процессы естественного возникновения, учитывая рост их повторяемости в последние годы (рис. 1) [1], но и могут приводить к большим экономическим потерям или человеческим жертвам.

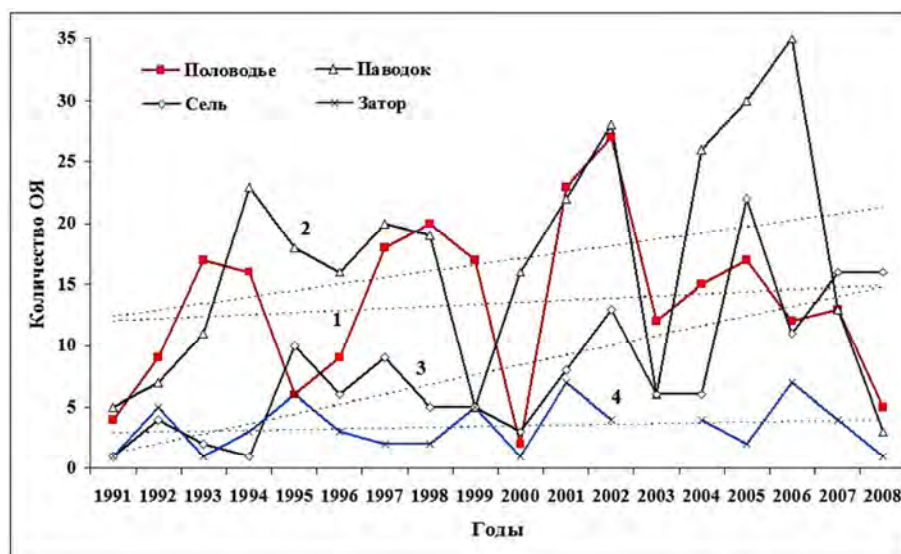


Рис. 1. Изменение повторяемости наводнений во время половодья (1), при паводках (2), селевых потоках (3) и ледовых заторах (4) за 1991–2008 годы [1]

Затопление территорий и разрушение объектов военной инфраструктуры при наводнениях существенно ограничивает применение войск в таких районах и требует автоматизированного контроля гидрометеорологической обстановки в них.

Актуальными объектами автоматизированного контроля гидрометеорологической обстановки являются дождевые паводки, которые имеют краткосрочный период зарождения и развития и наблюдаются на малых водосборах, что усложняет процесс их прогнозирования и подготовки к защитным мероприятиям населения и войск от наводнений. С другой стороны, такие условия формирования дождевых паводков позволяют вызывать их искусственным путем, инициируя интенсивные ливневые осадки на ограниченной территории или попуски воды из водохранилищ.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Для экспериментальной проверки работоспособности макета АПТК при контроле гидрологических процессов был выбран район реки Уссури – притока Амура, где в июле – сентябре 2013 года наблюдалось сильнейшее за всю историю инструментальных наблюдений катастрофическое наводнение, вызванное экстремальными дождями, которые продолжались около двух месяцев. Дождевой паводок охватил весь бассейн Амура, включая огромную территорию российского Дальнего Востока [2].

Была сформирована база данных (БД), включающая в себя морфометрические характеристики бассейна реки Уссури (табл. 1), ежедневные данные гидрологических наблюдений уровня реки на 10 гидрологических постах, ежедневные данные о количестве выпавших осадков в паводкоопасный период (май – октябрь) и др. [3].

Таблица 1

Характеристики гидрологических постов на реке Уссури

№ п/п	Название поста	Высота поста, м	Уклон реки, ‰	Площадь водосбора, км ²	Тип рельефа	Вид грунта русла	Тип растительности на склонах
1	Березняки	500	4.5	536	Горный	Каменистый	Горная
2	Верхняя Бреевка	368	2.6	1720	Горный	Каменистый	Горная
3	Новомихайловка	222	1.5	5170	Горный	Каменистый	Горная
4	Кокшаровка	164	1.1	23400	Равнина	Галька с сугл.	Лесная
5	Кировский	79	0.3	24400	Равнина	Галька с сугл.	Лесная
6	Лесозаводск	60	0.2	26200	Равнина	Ил и сугл.	Луговая
7	Графское	48	0.2	71700	Равнина	Ил и сугл.	Луговая
8	Тарташевка	48.5	0.1	106000	Равнина	Галька с сугл.	Лесная
9	Козловское	44	0.1	132000	Равнина	Ил и сугл.	Лесная
10	Шереметьево	0	0.2	156000	Равнина	Ил и сугл.	Лесная

Контроль дождевых паводков можно производить, используя очевидную связь между подъемом уровня реки при дождевом паводке и приведшим к этому подъему количеством выпавших осадков, зарегистрированных на ближайшей метеорологической станции. С учетом морфометрических характеристик водосбора реки рассчитывается количество выпавших осадков, которые привели к измеренному значению подъема уровня реки при дождевом паводке.

В случае, если наблюдавшееся значение количества осадков при дождевом паводке превышает расчетное более чем на 25–30 % (средняя относительная ошибка гидрологического прогноза) [4], то делается вывод о возможном воздействии на дождевой паводок (при условии отсутствия попусков воды из водохранилищ и разрушения плотин на них вверх по течению реки).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для контроля дождевого паводка предлагается упрощенный вариант методики, применяемой при расчете параметров дождевых паводков с малых водосборов и используемой в ходе проектирования дорог и пропускных сооружений [5–7].

Для определения расхода воды при дождевом паводке применяется формула связи между изменением глубины потока h_o и ливневым расходом q следующего вида:

$$h_o = \bar{m} \sqrt[3]{\frac{k_q}{I}}. \quad (1)$$

Здесь k_q – модуль расхода, $k_q = q / \sqrt{i_o}$, где i_o – уклон лога водотока; q – ливневой расход дождевого паводка, м³/с;

\bar{m} – параметр, учитывающий шероховатость русла;

I – сумма котангенсов уклона поперечных склонов живого сечения.

Для определения количества осадков, необходимых для получения данного значения ливневого расхода, используется формула связи между параметрами дождевого паводка вида

$$q = \phi(h - z)^m F^n K \delta \quad [\text{м}^3/\text{с}], \quad (2)$$

где q – расчетный ливневой расход воды, м³/с;

ϕ – морфологический коэффициент, зависящий от уклона главного лога;

h – слой водоотдачи, мм;

z – потери в слое ливневого стока на растительность, мм;

F – площадь водосбора, км²;

m, n – параметры соответствия, учитываемые с помощью таблиц;

K – коэффициент, учитывающий шероховатость лога и склонов;

δ – коэффициент, учитывающий озерность и заболоченность бассейна.

Объединяя формулы (1) и (2) и проведя необходимые преобразования, получаем выражение для расчета количества осадков вида

$$H = \frac{q}{12,36 \cdot \phi(0,296F + 2,81)K\delta} + 1,03 \cdot Z + 11,85. \quad (3)$$

Примеры результатов расчетов параметров дождевого паводка для 13.09.1980 на гидрологических постах реки Уссури приведены в табл. 2, в которой H_{ϕ} – фактическое количество осадков по данным измерений на метеорологической станции; H_p – расчетное количество осадков; $\frac{\Delta H}{H}$ – относительная ошибка.

Из анализа табл. 2 следует, что на гидрологических постах, располагающихся на равнине, относительная ошибка возрастает до 20–22 %, несмотря на снижение значения ливневого расхода дождевого паводка. Снижение ливневого расхода объясняется увеличением ширины русла реки при ее разливе на равнинных участках местности. Однако величина относительной ошибки расчета количества осадков остается меньше средней относительной ошибки,

что позволяет сделать вывод об отсутствии процесса инициирования дождевого паводка на реке Уссури.

Таблица 2

**Результаты расчетов параметров дождевого паводка
на гидрологических постах реки Уссури**

Гидропост	$z_0, \text{м}$	$h_0, \text{м}$	$i_0, \%$	$F, \text{км}^2$	φ	$q, \text{м}^3/\text{с}$	$H_{\text{ф}}, \text{мм}$	$H_{\text{р}}, \text{мм}$	$\Delta H/H$
Березняки	500	1.6	4.5	536	0.024	213.47	28.2	29.6	5.0
Вер.Бреевка	368	2.48	2.6	1720	0.016	604.52	28.2	32.1	19.7
Новомихай- ловка	222	2.32	1.5	5170	0.01	378.54	28.2	25.48	9.7
Кокшаров- ка	164	1.76	1.1	23400	0.006	102.22	28.2	22.48	10.3
Кировский	79	1.24	0.3	24400	0.003	18.42	28.2	22.26	21.1
Лесозаводск	60	0.93	0.2	26200	0.002	6.46	28.2	22.2	22.2
Шереметьево	0	0.87	0.2	156000	0.002	16.47	28.2	22.17	21.5

Дальнейшие численные эксперименты позволят расширить результаты расчетов как на весь район Приамурья, так и на бассейны рек других приграничных регионов в рамках функционирования автоматизированного программно-технического комплекса (АПТК).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дождевые паводки имеют краткосрочный период зарождения и развития и наблюдаются на малых водосборах, что усложняет процесс их прогнозирования и подготовки к защитным мероприятиям от наводнения. Их возникновение легко маскировать под естественные процессы, учитывая, что большая часть дождевых паводков наблюдается на реках в приграничных районах или на трансграничных территориях (Кавказ, Забайкалье и Дальний Восток).

Для контроля дождевых паводков использовались эмпирические соотношения, позволяющие рассчитать количество выпавших осадков, которое обеспечивает измеренную высоту дождевого паводка на гидрологических постах с учетом геометрических и морфометрических характеристик бассейна стока.

Проведенные расчеты позволили подтвердить работоспособность используемой методики в рамках функционирования автоматизированного программно-технического комплекса (АПТК) и учесть основные физические закономерности проявления такого сложного гидрологического процесса, как дождевой паводок.

Список используемых источников

1. Опасные природные процессы / А.В. Баринов, В.А. Седнев, А.Б. Шевчук и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 334 с.
2. Катастрофическое наводнение в Дальневосточном федеральном округе: научно-методический труд / МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. – Т. 1: Уроки и выводы. – 154 с.
3. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсе поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометиздат, 1989 – Т. 1: РСФСР, вып. 21: Бассейны Уссури и рек Японского моря.

4. Методические рекомендации по расчету максимального дождевого стока и его регулированию. – М.: Минтранстрой, 1980. – 41 с.
5. *Артемьев С.С., Болдаков Е.В., Журавлёв М.М.* Расчет ливневого стока с малых водосборов. – М.: Транспорт, 1995 – 278 с.
6. *Кронин Ю.А., Чёрный В.В.* Сборник заданий на групповые упражнения по дисциплине «Военная гидрология». – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1989. – 66 с.
7. СНИП 33-101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Росстандарт, 2003. – 70 с.

Д.А. Жохова*;

И.В. Кужевская*,

кандидат географических наук;

К.Н. Пустовалов**;

В.В. Чурсин**;

* Томский государственный университет, г. Томск

** ИМКЭС СО РАН, г. Томск

СЛУЧАЙ ЗИМНЕЙ КОНВЕКЦИИ ПО ДАННЫМ ATOVS

Рассмотрен случай зимней конвекции на фронте окклюзии. Представлены результаты работы с данными спутникового температурно-влажностного зондирования атмосферы ATOVS и облачными продуктами MODIS.

Ключевые слова: спутниковые данные, гроза, Западная Сибирь.

ВВЕДЕНИЕ

Опасные атмосферные явления, связанные с конвективной деятельностью в зимний период, являются малоизученными и трудно прогнозируемыми. Обнаружение участков с конвективной облачностью и грозовых очагов в настоящее время возможно только при использовании метеорологических локаторов или спутникового зондирования. Но сеть МРЛ не имеет желаемой частоты распределения по исследуемой территории Западной Сибири, и не всегда удается дать прогноз грозы, особенно зимой, с достаточной заблаговременностью. Поэтому является актуальным исследование зимних гроз с помощью спутниковых данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были применены данные о вертикальном профиле температуры воздуха и удельной влажности, полученные в Сибирском центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"» [7] на основе измерений комплекса инструментов зондирования атмосферы Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS) КА «NOAA 18, 19». Данные ATOVS имеют пространственное разрешение 0.25° по широте и долготе, для 42 уровней по изобарической высоте от 1050 до 0.1 гПа. Для исследования была использована информация для 20 уровней в слое от 1000 до 100 гПа, который примерно соответствует тропосфере [11]. С помощью пакета MatLab осуществлялось картирование значений удельной влажности (q , г/кг), температуры воздуха (T , °C), индекса неустойчивости (KI , °C). Также были использованы алгоритмы для визуализации продуктов дистанционного зондирования MODIS ATML2 [10].

Индекс KI вычисляется на основе данных температуры воздуха и температуры точки росы (T_d , °C) на уровнях изобарических поверхностей 850, 700 и 500 гПа в соответствии с формулой: $KI = T_{850} + T_{d850} - T_{700} + T_{d700} - T_{500}$.

Шкала оценки вероятности возникновения грозы по значениям индекса KI представлена в [5].

Целью настоящей публикации являлась оценка параметров облачности и состояния атмосферы на момент развития зимней конвекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛУЧАЯ ЗИМНЕЙ КОНВЕКЦИИ ПО ДАННЫМ ATOVS

Рассматриваемый в работе случай зимней грозы был зафиксирован в Новосибирске 9 декабря 2015 года. Локальная гроза с 20:22 до 20:35 по местному времени (13:22-13:35 UTC) была зафиксирована только метеостанцией «Учебная» и МРЛ в аэропорту Толмачёво [3].

В декабре 2015 года в Западной Сибири наблюдались положительные температурные аномалии 6–8° С, они были связаны с частым влиянием западных и южных циклонов, которые распространяли атлантическую воздушную массу до западных районов Якутии. Азиатский антициклон не был сильно развит и представлял собой частные барические образования над южными районами Сибири, востоком Якутии. Во многих пунктах были установлены новые рекорды суточного максимума температуры воздуха. На ряде станций суточные максимумы превысили +2°С. Так, аномалия среднемесячной температуры в Томске зафиксирована на уровне 8,8°С, вероятность повторения которой составляет раз в 134 года. Перемещение волновых циклонов вдоль южной фронтальной системы на территории Сибири сопровождалось в отдельные дни декабря интенсивными осадками в виде снега с перекрытием абсолютных суточных значений (до 13 мм) [1].

В конце первой декады на фоне температурных аномалий при прохождении фронта окклюзии по югу Западной Сибири развитие конвекции позволило сформироваться очагам гроз.

В целом фронт окклюзии отличается большим разнообразием масштабов и не является простым соединением облачных систем холодного и теплого фронтов. По [6] окклюдирование сопровождается резким увеличением вертикальной мощности облачной системы, что связано с конвергенцией в приземном слое. При слиянии холодного фронта второго рода с теплым развитие внутри слоистой облачности *Cu cong* и *Cb* вполне типично. Нередко наблюдаются мезомасштабные неоднородности в виде полос, в длину превышающие 300 км, ориентированные под некоторым углом к направлению приземной линии фронта.

Кроме того, крупномасштабный поток является фактором, упорядочивающим мезоструктуру полей облаков и осадков. В нижней части циклона располагается несущая полоса, благодаря которой осуществляется вертикальный и горизонтальный перенос теплого влажного воздуха. Над несущей полосой располагается поток ненасыщенного воздуха, возникает дифференциальная адвекция: теплый влажный воздух поступает снизу, а холодный сухой воздух – сверху, стратификация становится неустойчивой, следовательно, развивается конвективная облачность в поле слоистой, в частности – затопленная. В неустойчивом слое формируются ячейки генерации (засаевающий слой), в нем возникают ледяные частицы, которые при выпадении вниз «засаевают» нижний облачный слой, где кристаллы постепенно вырастают в частицы осадков.

Вполне возможно, что в рассматриваемом случае имело место именно такое развитие процессов.

Для анализа облачности в день с зимней грозой были использованы материалы сайта EOSDIS Worldview [9]. В облачности рассмотренного фронта окклюзии преобладают слоистообразные облака, в которых просматриваются облака вертикального развития *Cu*, *Cb*, *Si*.

Рассматриваемое образование отчетливо выражено на монтаже двух последовательных гранул облачного продукта MODIS ATML2 [10], где была воспроизведена высота верхней границы облачности (рис. 1). При построении 3D карт высоты ВГО темным цветом выделены очаги формирования кучево-дождевой облачности, значительной по высоте.

Для оценки вероятности формирования грозовых ячеек в этот день, 9 декабря 2015 года, было проведено также и 2D картирование индекса неустойчивости атмосферы KI (рис. 2). Как можно заметить, над рассматриваемой территорией значения KI варьируются от 18 до 22° С, что соответствует примерно 30–50 % вероятности формирования гроз по шкале [5].

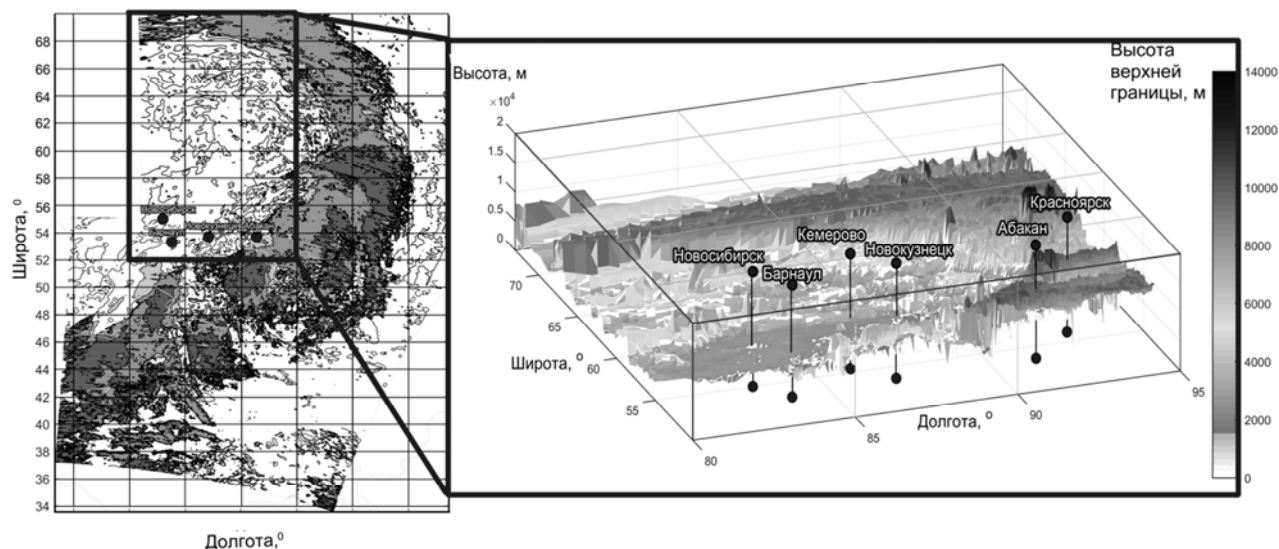


Рис. 1. Монтаж облачного продукта ATML2 – высота верхней границы облачности за 05:00 и 05:05 UTC в 2D и 3D проекциях

По данным радиометра ATOVS горизонтальный градиент температуры воздуха по территории Западной Сибири составил около 10°C на 1000 км, этого более чем достаточно для формирования циклонических возмущений [4]. Значения поля удельной влажности у поверхности Земли составили 5-6 г/кг.

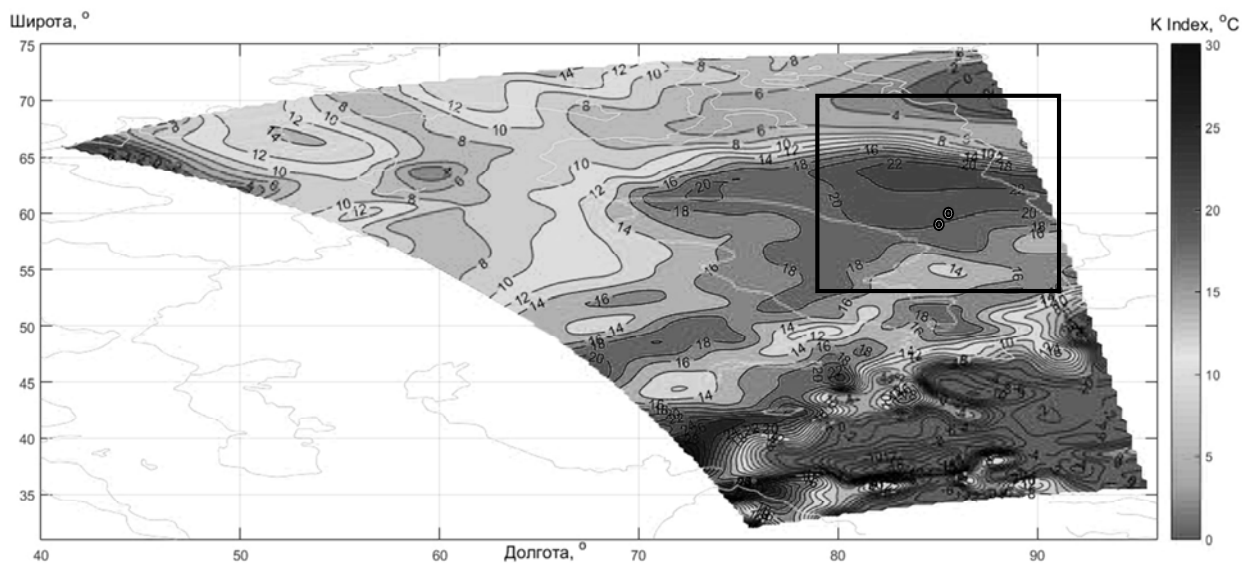


Рис. 2. Контурная карта значений индекса неустойчивости атмосферы – KI на изобарической высоте 1000 гПа, построенная по данным ATOVS за 08:14 UTC 09.12.15 г.

Стоит отметить, что восстановленные данные температурно-влажностного спутникового зондирования имеют погрешности [8], не влияющие на понимание формирования процессов.

На данный момент все атмосферные процессы, связанные с фронтами окклюзии, довольно легко прогнозируются. Описание изменчивости же процессов на коротких интервалах времени обуславливает необходимость перехода к технологии детального анализа текущей погоды и ее экстраполяция на 2 ч вперед – наукастинга, требующего непрерывных измерений с

большой плотностью. Информация о таком комплексе характеристик облачности и атмосферных явлений востребована в рамках метеорологического обслуживания авиации.

Представленные в работе материалы иллюстрируют метеорологическую обстановку за 5–8 ч до начала явления, что как раз соответствует заблаговременности, позволяющей составить краткосрочный прогноз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные спутникового зондирования позволяют увидеть распределение приземной температуры и влагосодержания воздуха с определенной точностью, а также рассчитать индекс неустойчивости атмосферы. Облачный продукт ATML2 позволяет оперативно оценить высоту верхней границы облачности.

Зафиксированные значения КИ от 18 до 22° С при положительных температурах подстилающей поверхности способствовали развитию грозы на фронте окклюзии.

Таким образом, уже на этапе формирования процесса при совместном анализе индекса неустойчивости КИ, удельной влажности, температуры, высоты верхней границы облачности можно получить оценку вероятности грозы, что, в свою очередь, может улучшить качество прогнозов подобных явлений.

Список используемых источников

1. *Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в декабре 2015 г. // *Метеорология и гидрология.* – 2016. – №3. – С. 115–120.
2. *Вельтищев Н.Ф.* Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование: сборник лекций: пособие для самостоятельной работы студентов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 136 с.
3. Гроза зимой в Новосибирске. – URL: <http://earth-chronicles.ru/news/2015-12-10-86955> (дата обращения: 20.02.2018).
4. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология: учеб. пособие для вузов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1957. – 558 с.
5. Индекс неустойчивости. – URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 05.12.2017).
6. *Мазин И.П., Шметер С.М.* Облака: строение и физика образования. – Л.: Гидрометиздат, 1983. – 279 с.
7. НИЦ Планета. – URL: <http://www.rcpod.ru> (дата обращения: 27.02.2018).
8. *Щукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М.* Микроволновый радиометр для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* – 2013. – №1. – С. 28–31.
9. EOSDIS Worldview. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 20.02.2018).
10. MODIS . – URL: <https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 28.02.2018).
11. NOAA National oceanic and atmospheric administration. – URL: <http://www.noaa.gov/about-noaa.html>. (дата обращения: 20.01.2018).

В.Ю. Жуков*,

кандидат техн. наук;

М.С. Рыков**;

С.С. Суворов*,

доктор физико-математических наук, профессор;

Г.Г. Щукин*,

доктор физико-математических наук, профессор

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

** Акционерное общество «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург

ОЦЕНИВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ С ПОМОЩЬЮ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА

Рассматриваются методы оценивания интенсивности осадков метеорологическим радиолокатором. Описывается методика проведения эксперимента по исследованию применимости нового метода, основанного на поляризационных измерениях, в отечественном метеорологическом радиолокаторе ДМРЛ-С. Делается вывод об отсутствии качественных различий в картах интенсивности осадков, полученных традиционным и новым методом.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, измерение интенсивности осадков, поляризационные характеристики принимаемого сигнала.

Определение интенсивности осадков является одной из основных функций метеорологического радиолокатора. Традиционно они оцениваются по величине радиолокационной отражаемости целей, расположенных ниже отметки 1 км по высоте. При этом применяется метод, основанный на предположении, что размеры частиц распределены по формуле Маршалла – Пальмера [1]:

$$Z = AI^b, \quad (1)$$

где Z – радиолокационная отражаемость цели;

I – интенсивность осадков;

A, b – коэффициенты, зависящие от вида осадков.

Главный недостаток данного метода – малая точность. Получаемые при нем ошибки оцениваются от 300 [2] до 600 % [3]. Естественно стремление разработчиков улучшить данные показатели путем нахождения новых методов оценивания [4]. Возможность их разработки появилась только с внедрением в практику радиолокационных наблюдений поляриметрии. Был предложен новый метод, основанный на использовании дифференциальной фазы и дифференциальной отражаемости эхо-сигнала осадков.

Суть его состоит в том, чтобы использовать зависимость затухания отраженной частицами волны A от интенсивности осадков I на пути ее распространения [5]. Данная зависимость имеет вид

$$I = c_1(t)c_2(\lambda)A^{1.03}, \quad (2)$$

где $c_1(t)$, $c_2(\lambda)$ – коэффициенты, зависящие от температуры частиц t и длины волны несущего колебания локатора λ .

Величину ослабления на дальности r находят из профиля радиолокационной отражаемости $Z(r)$ в соответствии с выражением

$$A(r) = \frac{[Z(r)]^b C(b, PIA)}{J(r_1, r_2) + C(b, PIA)J(r, r_2)}, \quad (3)$$

$$\text{где } J(r_1, r_2) = 0,46b \int_{r_1}^{r_2} [Z(x)]^b dx;$$

$$J(r, r_2) = 0,46b \int_r^{r_2} [Z(x)]^b dx;$$

$$C(b, PIA) = \exp(0,23bPIA) - 1;$$

r_1, r_2 – начальная и конечная дальности участка с наблюдаемыми осадками;

b – постоянный коэффициент, величина которого лежит в пределах 0,6–0,9 и зависит от длины волны радиолокатора;

PIA – интегральное ослабление на участке, занятом осадками.

Величина PIA нам заранее не известна. Она вычисляется исходя из следующей зависимости от дифференциальной фазы:

$$PIA(r_1, r_2) = \alpha [\Phi_{DP}(r_1) - \Phi_{DP}(r_2)], \quad (4)$$

где величина постоянной α определяется частотой несущего колебания и может корректироваться в процессе измерений по получаемым оценкам дифференциальной отражаемости Z_{DR} на участке луча от r_1 до r_2 .

Данный метод внедрен на сети штормоповещения США и позволяют в два раза увеличить точность получаемых оценок.

В связи со сказанным встает вопрос о его применимости в отечественных радиолокаторах ДМРЛ-С, отличающихся от американских более короткой длиной волны несущего колебания и использованием сложного зондирующего импульса.

Экспериментальная проверка методики определения интенсивности осадков при помощи оценок поляризационных параметров принимаемого сигнала затруднена отсутствием (или недоступностью) архивных сайтов с данными об интенсивности и количестве выпавших осадков. Поэтому сравнение пришлось проводить чисто качественное. Оно проводилось по следующей методике:

1) брались объемные файлы данных, поступающие из системы первичной обработки информации радиолокатора;

2) информация о радиолокационной отражаемости целей обрабатывалась традиционным методом Маршалла – Пальмера. Формировалась первая карта интенсивности осадков;

3) данные об отражаемости и поляризационных характеристиках принятого сигнала использовались для расчета интенсивности осадков по новому методу. При этом решались следующие задачи:

– выполнялась сегментация луча. Суть ее заключается в том, чтобы определить в каждом луче участки, где наблюдается изменение значений дифференциальной фазы.

Таким образом, в отдельно взятом луче может находиться несколько таких участков. Это позволяет уменьшить ошибки определения интенсивности осадков, связанные с возможным завышением интенсивности к концу луча, если сегмент имеет большую протяженность, и присутствуют высокие значения отражаемости ($Z > 50$). Примеры карт интенсивности осадков, полученные с сегментацией луча и без нее, представлены на рис. 1. На нем хорошо видно, что применение сегментации улучшает качество расчета интенсивности осадков в каждом сегменте луча;

– исключалось влияние местных объектов. Для этого использовался модуль коэффициента взаимной корреляции. Если его значение было больше 0,8, цель идентифицировалась как метеорологическая. В противном случае данные соответствующей ячейки исключались из дальнейших расчетов. Благодаря такому подходу достигалось почти полное исключение влияния местных объектов на оценку интенсивности осадков. Карты, приведенные на рис. 2 и 3, иллюстрируют влияние, оказываемое на принимаемый сигнал местными предметами;

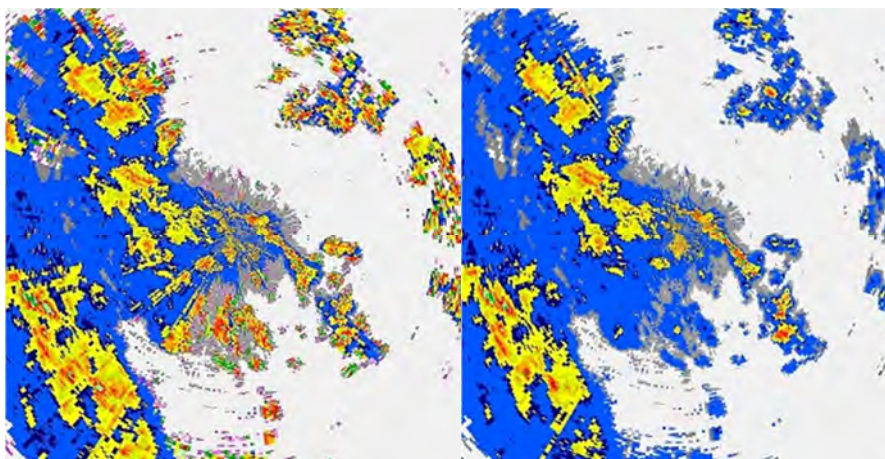


Рис. 1. Карты интенсивности осадков, рассчитанные новым методом, без применения сегментации луча (слева) и с его применением (справа)

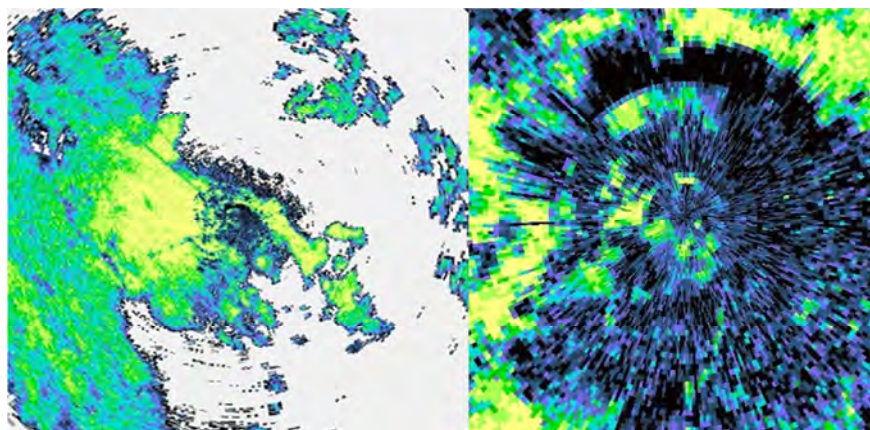


Рис. 2. Карты коэффициента взаимной корреляции с фильтрацией отражений от местных предметов (слева) и без фильтрации (справа)

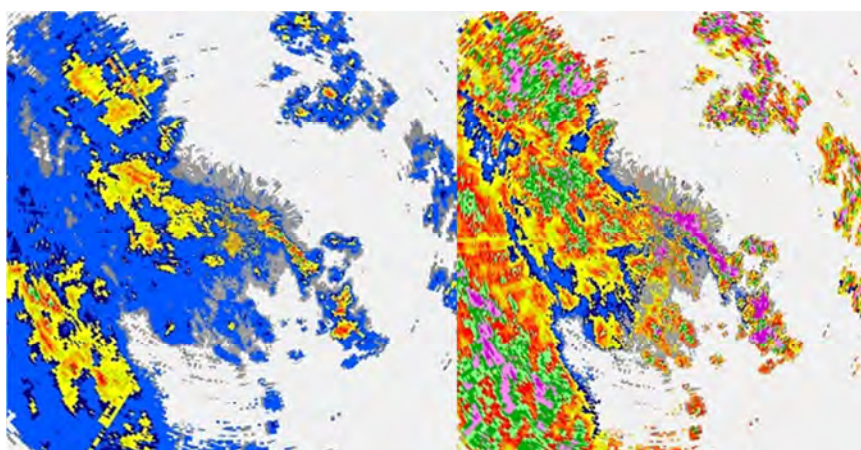


Рис. 3. Карты интенсивности осадков, рассчитанные новым методом, с учетом коэффициента взаимной корреляции (слева) и без него (справа)

– определялись разности значений дифференциальной фазы в начале и конце выбранного участка. Проблема состояла в том, что указанный параметр есть величина случайная. Поэтому нередко получалось так, что ее значение в конце сегмента оказывалось меньше, чем

в его начале. Решалась она аппроксимацией всех отсчетов на протяжении сегмента линейной зависимостью методом наименьших квадратов.

После решения перечисленных задач строилась вторая карта интенсивности осадков, которая сравнивалась с первой на предмет отсутствия грубых расхождений в получаемых результатах. Пример пары карт приведен на рис. 4.

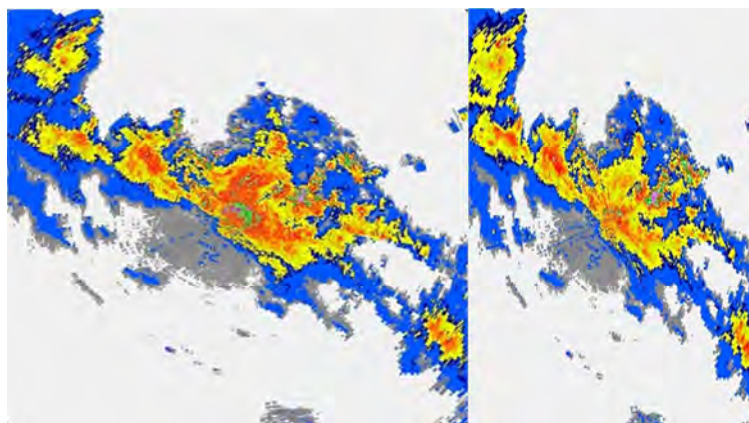


Рис. 4. Карты интенсивности осадков, рассчитанные по методу, основанному на распределении Маршалла – Пальмера (слева) и новым методом (справа)

В итоге было констатировано, что карты в целом одинаково отражают распределение интенсивности осадков по просматриваемой площади и не имеют серьезных отличий друг от друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют заключить следующее. Обработка данных системы первичной обработки радиолокатора ДМРЛ-С с целью определения интенсивности осадков методом Маршалла – Пальмера и новым методом с применением оценок поляризационных параметров принимаемого сигнала показала хорошее совпадение получаемых при этом карт и отсутствие серьезных расхождений между ними.

Для количественной оценки точности нового метода определения интенсивности осадков требуется организация эксперимента с использованием данных наземных осадкомеров и плувиографов.

Список используемых источников

1. РД 52.04.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993.
2. Радиолокационные измерения осадков / А.М. Боровиков, В.В. Костарев, И.П. Мазин и др. – Л.: Гидрометеиздат. 1967.
3. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1966.
4. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Современные проблемы метеорологической радиолокации // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 10. – С. 927–939.
5. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking / A.Ryzhkov, M.Diederich, P.Zhang, C.Simmer // Journal of atmospheric and oceanic technology. – 2014. – Vol.31. – P. 599–619.

Д.В. Кирин*;

Н.О. Крутиков*;

А.Н. Лукьянов*;

кандидат физико-математических наук;

А.М. Струнин*;

кандидат физико-математических наук;

М.А. Струнин*;

доктор физико-математических наук

*ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ РЕГИОНОВ АРКТИКИ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2014–2015 ГОДАХ

Представлены предварительные результаты исследований распределения атмосферного аэрозоля различного происхождения (мелкого и субмикронного аэрозоля – в диапазоне от 0,03 до 3 мкм, частиц черной сажи) в арктических регионах – районах г. Нарьян-Мар, полуострова Ямал, северной оконечности архипелага Новая земля и Московском регионе с помощью самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет». Приводятся результаты компьютерного моделирования переноса воздушных масс, объясняющих возникновение аномалий в концентрациях частиц аэрозолей. Показано, что концентрации аэрозолей в арктическом регионе существенно зависят от метеорологических условий и структуры воздушных течений синоптического масштаба. Концентрации аэрозолей в районах северной оконечности Новой Земли или в районе г. Нарьян-Мар могли меняться в широких пределах, в то время как в Московской области (в окрестностях г. Жуковский) уровень концентраций был неизменно высок. Концентрации черной сажи на уровнях выше 3 км были пренебрежимо малы. Приводятся сравнительные оценки общего содержания массы аэрозольных частиц в арктических регионах и в окрестности мегаполиса (г. Москвы).

Ключевые слова: атмосфера, ветер, температура, аэрозоли, самолетные измерения, Арктика.

ВВЕДЕНИЕ

Антропогенное загрязнение Арктики считается одной из наиболее вероятных причин ее потепления в последние годы [1]. Крупные европейские города являются источником выброса в атмосферу аэрозолей различного происхождения – мелкого и субмикронного аэрозоля, частиц черной сажи [2]. Наличие значительных концентраций сажевого аэрозоля обнаруживается даже в удаленных районах Арктики, а вследствие его высокой поглощающей способности света он способен влиять на замутнение и тепловой баланс атмосферы [3]. Имеются свидетельства о существенных увеличениях концентраций в атмосфере субмикронных частиц с размерами менее 0,1 мкм [4]. Контроль концентраций аэрозоля и особенностей его распространения в Арктике и других регионах необходим для оценок и прогноза изменения климата и решения ряда задач экологической направленности, а одним из наиболее действенных инструментов для этого может служить самолет-лаборатория.

САМОЛЕТ-ЛАБОРАТОРИЯ ЯК-42Д «РОСГИДРОМЕТ» И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОЗОЛЕЙ В АРКТИКЕ

Самолет-лаборатория нового поколения Як-42Д «Росгидромет» [5], оснащенный, в частности, комплексом аппаратуры для измерения и регистрации аэрозольных компонентов атмосферы, высокоточными навигационными системами и оборудованием для определения

термодинамических параметров атмосферы, был использован для исследований распространения аэрозольных примесей в Арктическом и Московском регионах. Для измерения субмикронных частиц в диапазоне размеров 0,055–1 мкм использовался самолетный спектрометр субмикронных частиц UHSAS фирмы Droplet Measurement Technologies, Inc. (Boulder, Colorado, 80301, P.O. Box 20293). Для измерения мелких частиц аэрозоля в диапазоне от 0,1 до 3 мкм применялся датчик-спектрометр с пассивной полостью Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe PCASP -100X. Для измерения концентрации и массы частиц сажи использовался прибор SP-2 [6]. Частота регистрации данных составляла 1 отсчет в секунду, данные о концентрациях частиц корректировались по давлению и температуре воздуха на уровне полета самолета. Все результаты аэрозольных измерений приводились в соответствие с данными навигационных систем самолета-лаборатории (координатами места), высотой полета и термодинамическими параметрами атмосферы (температурой воздуха, скоростью и направлением ветра).

Всего с помощью самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» было выполнено пять серий исследований в Арктическом регионе – в районах полуострова Ямал, Карского моря и архипелага Новая Земля и Московском регионе. Все выполняемые летные исследования предварялись компьютерным моделированием переноса воздушных масс в двух режимах: первый режим – режим трансграничного переноса, представлявший собой анализ переноса примесей из Европейского региона. Второй режим – оценка регионального переноса аэрозольных примесей, обусловленных, как правило, нефте- и газодобычей на полуострове Ямал. Компьютерное моделирование позволило понять особенности фактического распределения аэрозолей в атмосфере Арктики и Московской области.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АРКТИКЕ И МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ

Исследования распространения аэрозолей осуществлялись во время полета самолета-лаборатории с переменным высотным профилем и на вертикальных зондировках атмосферы в отдельных точках – над аэропортом г. Нарьян-Мар, полуостровом Ямал в районе мыса Каменный (Обская губа) и Северной оконечностью острова Новая Земля, а также в окрестности г. Москва.

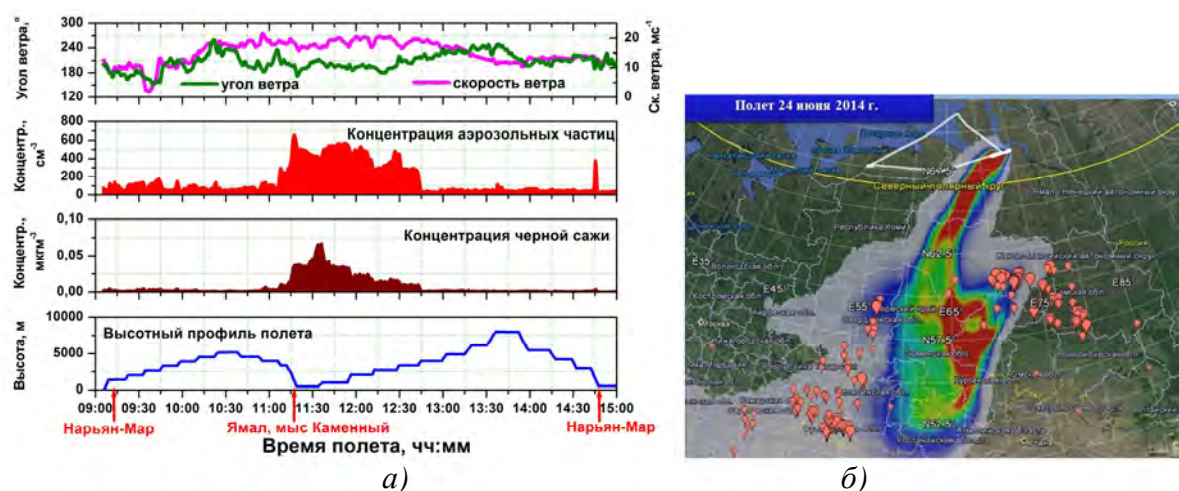


Рис. 1. Результаты самолетных исследований аэрозолей по маршруту Нарьян-Мар – Ямал (мыс Каменный) – Нарьян-Мар 24 июня 2014 года: а – высотный профиль полета, массовые концентрации черной сажи и четные концентрации аэрозольных частиц и скорости и направления ветра вдоль маршрута полета; б – результаты компьютерного моделирования распространения аэрозолей из районов нефте- и газодобычи (красным цветом выделены максимальные концентрации условного аэрозоля)

На рис. 1,а представлен высотный профиль полета 24 июня 2014 года в район полуострова Ямал и значения концентраций аэрозоля и сажи вдоль трассы полета самолета-лаборатории. Особо значительным содержание аэрозоля оказалось над полуостровом Ямал в районе мыса Каменный, где была выполнена вертикальная зондировка. Основной причиной повышенной концентрации аэрозолей, согласно данным компьютерного анализа (рис. 1,б), послужил вынос воздушных масс с южных направлений, где и были расположены районы нефте- и газодобычи. Это подтверждалось и измеренными с борта самолета значениями направления ветра, которое также показало преобладание ветров южного направления. Массовые концентрации черной сажи и аэрозоля в районе мыса Каменный были велики и вполне сопоставимы с уровнем аэрозольного загрязнения в Московском регионе. Нарьян-Мар оказался вне зоны выноса аэрозолей, поэтому концентрации черной сажи даже в нижних слоях атмосферы были малы, несмотря на конвективный характер развития пограничного слоя.

Летные эксперименты по исследованию аэрозолей над Карским морем и северным островом Новая Земля были выполнены 3 ноября 2014 года и 28 февраля 2015 года по одной и той же схеме, но при различных условиях поступления аэрозольных примесей в регион. Результаты исследований представлены на рис. 2 и 3. Отметим, что исследования проводились по маршруту Нарьян-Мар – Новая Земля – Нарьян-Мар, причем над Нарьян-Маром и Новой Землей выполнялись вертикальные зондировки атмосферы. По завершении исследований самолет возвращался в Москву, что позволяло получить данные для этого дня для Московского региона. Компьютерное моделирование переноса примесей для 3 ноября 2014 года (рис. 2,а) показало, что в районе г. Нарьян-Мар основным источником загрязнений послужил вынос примесей с полуострова Ямал. В то же время северная часть Карского моря оказалась вне зоны распространения аэрозолей, а воздушные и относительно «чистые» массы здесь перемещались с западного направления, о чем свидетельствовало и измеренное с борта самолета направление ветра. Как следствие, концентрации сажи были значительны в районе Нарьян-Мара и в утренние и в дневные часы, а на севере Новой Земли даже в пограничном слое атмосферы они были пренебрежимо малы.

Основное направление перемещения воздушных масс над Карским морем и Новой Землей 28 февраля 2015 года было северо-восточным, приводящим к выносу загрязняющих аэрозольных примесей из Западной Европы (рис. 2,б). Влияние региональных источников загрязнений на полуострове Ямал на структуру концентраций сажи в Нарьян-Маре и над Новой Землей было незначительным. Отметим, что профили концентраций черной сажи, полученные в дневные и вечерние часы над Нарьян-Маром и в вечерние часы над Московским регионом в один и тот же день, 28 февраля 2015 года (рис. 3,б), оказались близки между собой. Это свидетельствовало о том, что основным источником загрязнений в этот период служили воздушные потоки из Западной Европы. Профили потенциальной температуры показали неустойчивое состояние пограничного слоя. Концентрации сажи над Новой Землей оказались значительными и существенно большими, чем в эксперименте за 3 ноября 2014 года.

Практически во всех случаях в Подмоскowie максимум концентраций аэрозоля наблюдался в самых нижних слоях атмосферы, вплоть до приземного слоя. Это означало, что формирование загрязняющего слоя происходило непосредственно в регионе, а распространение аэрозоля осуществлялось за счет ветров в пограничном слое атмосферы и турбулентного перемешивания. В северных районах максимумы концентраций, как правило, находились на высотах более 1 км, что свидетельствовало о переносе примесей на высотах из удаленных регионов. Общее содержание аэрозоля в толще исследуемой атмосферы (на квадратный метр поверхности) могло варьироваться в достаточно широких пределах (табл. 1): в Московском регионе – более чем в два раза; над Нарьян-Маром и над северной оконечностью Новой Земли – более чем на порядок, в зависимости от структуры воздушных потоков из Европы или полуострова Ямал.

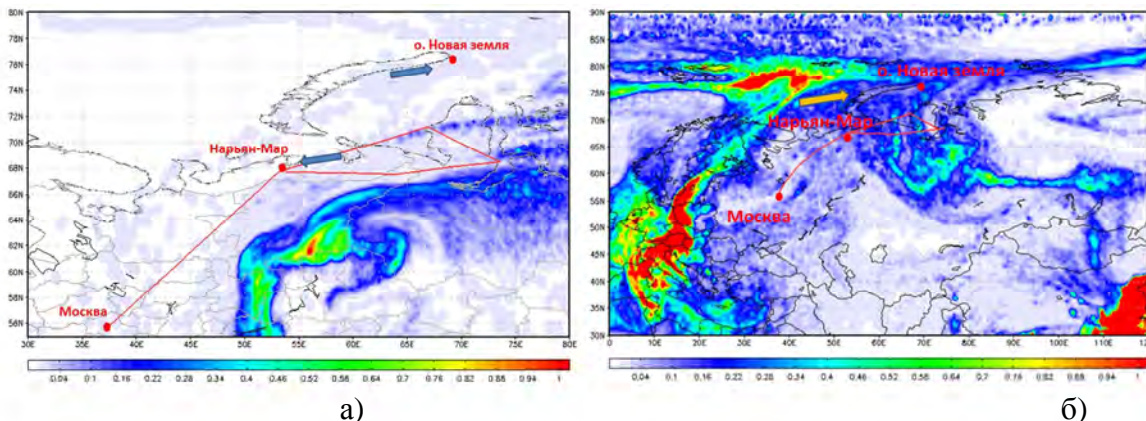


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования переноса воздушных масс в район Нарьян-Мара и Карского моря: а – 13:00 МСК 3 ноября 2014 года; б – 12:00 МСК 28 февраля 2015 года. Концентрации условной примеси выделены цветами. Стрелками выделено направление переноса в точках зондирования

Максимальные значения содержания черной сажи наблюдались в Московском регионе – около 170 мкгм^{-2} , в северных районах – 90 мкгм^{-2} . Большое количество аэрозольных частиц – до 160×10^8 на квадратный метр – отмечено над Ямалом, что было существенно выше, чем максимальные значения в Московском регионе – 80×10^8 на квадратный метр.

Таблица 1

Оценки общего содержания массы аэрозоля в толще атмосферы

Регион	Черная сажа, Мкгм^{-2}	Мелкий и субмикронный аэрозоль (0,055 – 3 мкм), 10^8 м^{-2}
Московская область	72–170	30–80
Район г. Нарьян-Мар	7–90	25–50
Район архипелага Новая Земля	4–90	–
Полуостров Ямал (мыс Каменный)	80	160

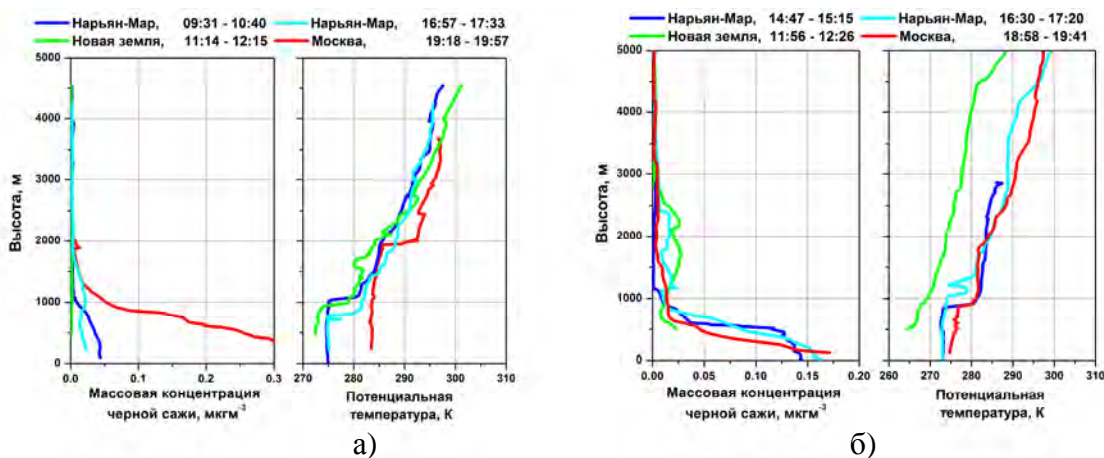


Рис. 3. Профили массовой концентрации черной сажи и потенциальной температуры в районах городов Нарьян-Мар, Москва и северной оконечности о. Новая Земля, полученные в полетах 3 ноября 2014 года (а) и 28 февраля 2015 года (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных и компьютерное моделирование переноса воздушных масс показало, что концентрации аэрозолей в Арктическом регионе существенным образом зависят как от локальных метеорологических условий, так и от структуры воздушных течений синоптического масштаба. Концентрации аэрозолей в районах северной оконечности Новой Земли или в районе г. Нарьян-Мар изменялись в широких пределах, но при выносе воздушных масс из Европейских регионов могли превышать уровень загрязнений в Московской области, где он был неизменно высок.

Основная масса аэрозоля находилась в нижних слоях тропосферы. В Московской области максимумы концентраций мелкого и субмикронного аэрозоля и частиц черной сажи наблюдались в нижней части пограничного слоя атмосферы, а в Арктических регионах практически всегда находились на высотах более 1 км, что свидетельствовало о переносе примесей из удаленных регионов.

Для полноценного анализа аэрозольных загрязнений Арктики необходимы регулярные самолетные исследования в сочетании с компьютерным моделированием.

Список используемых источников

1. GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). – URL: http://data.giss.nasa.gov/gistemp/time_series.html (дата обращения: 12.02.2018).
2. Характеристики атмосферного аэрозоля в Московском регионе / Н.О. Плауде, Е.А. Стулов, И.П. Паршуткина и др. – М.: Научный мир, 2008. – 79 с.
3. Black carbon measurements in the Arctic UT/LS / D. Baumgardner, G. Kok, G. Raga, G. Diskin, G. Satche // J. Aerosol Sci. EAC. – 2003. – P. 979–980.
4. Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere / J.P. Schwarz, R. S. Gao, D.W. Fahey et al // J. Geoph. Res. – 2006. – Vol. 111. – D16207.
5. Бортовые комплексы самолета-лаборатории нового поколения Як-42Д «Росгидромет» для измерения и регистрации навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы / Н.В. Базанин, Ю.А. Борисов, В.В. Волков и др. // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 11. – С. 109–116.
6. *Zheng Guoguang*. A national key research project: demonstration of precipitation enhancement techniques / Eight WMO Sci. Conf. on Wea. Mod. Casablanca, Morocco, April 2003. – 2003. – WMP Report № 39. – P. 31–33.

Ю.А. Летучий,
доктор техн. наук, профессор
ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

ОЦЕНИВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОБЪЕКТАХ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье представлены предложения по оцениванию экологической обстановки на объектах войск (сил). Содержание и объем данных, включаемых в оценку экологической обстановки, зависит от уровня негативного воздействия на окружающую среду (категории объекта). В общем случае оцениванию подлежат: 1) состояние потенциально экологически опасных военных объектов; 2) загрязнение компонентов природной среды; 3) влияние загрязнения природной среды на здоровье человека; 4) состояние естественных экологических систем в районе размещения войск (сил).

Ключевые слова: экологическая обстановка, военные объекты, компоненты природной среды, здоровье человека, естественные экологические системы.

Экологическую обстановку в воинских формированиях предлагается характеризовать следующими составляющими:

1) состоянием потенциально экологически опасных (военных) объектов (ПЭОВО), которые могут негативно влиять на окружающую среду, личный состав и население в зоне их влияния;

2) загрязнением компонентов природной среды (земли, недр, почвы, поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха, а также озонового слоя атмосферы и околоземного космического пространства, обеспечивающих в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле);

3) влиянием загрязнения природной среды на здоровье личного состава и населения в зоне ответственности войск (сил);

4) состоянием естественных экологических систем в районе размещения воинских формирований, природного ландшафта, элементы которых или сохранили свои природные свойства, или созданы человеком для рекреации и защиты среды обитания (последние относят к природно-антропогенным объектам).

Оценивание состояния ПЭОВО. В перечень наиболее характерных экологически опасных объектов ВС РФ входят:

- военные объекты, работающие с ядерными боеприпасами;
- военные объекты, работающие с ракетами и ракетным топливом;
- военные объекты, работающие с химическими боеприпасами;
- пункты технического обслуживания боевой, специальной техники и транспорта;
- склады горюче-смазочных материалов, пункты заправки техники и автотранспорта;
- склады боеприпасов;
- действующие аэродромы;
- военно-морские базы;
- общевойсковые полигоны;
- военные городки и т.д.

За анализируемый период оцениваются результаты работы ПЭОВО, эксплуатация которых сопровождается выбросом загрязняющих веществ в атмосферный воздух и (или) загрязнением поверхностных вод и водоемов и(или) вредным воздействием на поверхность земли и(или) вредным воздействием физических факторов на местное население, флору и фауну. Приводится время работы в штатном режиме с обусловленными техническими характери-

стиками, номенклатурой и объемами выбросов (сбросов); случаи работы в условиях аварии с номенклатурой и объемами аварийных выбросов (сбросов); чрезвычайные ситуации на ПЭОВО, приведшие (или способные привести) к людским и материальным потерям. Отмечаются случаи появления новых образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), которые могут изменить установленную ранее категорию объекта или перечень загрязняющих веществ, влияющих на ОЭБ.

В заключение обосновывается подтверждение категории экологически опасного объекта ВС РФ. Для ПЭОВО, оказывающих минимальное негативное воздействие на окружающую среду (IV категория), оценивание экологической обстановки можно завершить.

Загрязнение компонентов природной среды. Задача второго этапа оценивания экологической обстановки – представить количественные и качественные характеристики загрязнения атмосферного воздуха, поверхностных вод (акватории) и земель на территории воинской части. Номенклатура загрязняющих веществ определяется на первом этапе оценивания при анализе негативного воздействия ПЭОВО.

При одновременном присутствии нескольких загрязняющих веществ степень загрязнения атмосферного воздуха оценивается по комплексному показателю P по 5-балльной шкале в соответствии с табл. 1.

Комплексный показатель P вычисляется по формуле [3]

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2}, \quad (1)$$

где $K_i = C_i / \text{ПДК}_i$;

C_i – концентрация i -го вещества;

ПДК_i – предельно допустимая среднесуточная концентрация i -го вещества.

Таблица 1

Оценки загрязнений атмосферного воздуха в зависимости от P и числа загрязняющих веществ

Уровень загрязнения атмосферного воздуха	Градации P в зависимости от количества загрязняющих веществ (ЗВ)			
	(2–3) ЗВ	(4–9) ЗВ	(10–20) ЗВ	более 20 ЗВ
I – допустимый	2	3	4	5
II – слабый	2,1–4	3,1–6	4,1–8	5,1–10
III – умеренный	4,1–8	6,1–12	8,1–16	10,1–20
IV – сильный	8,1–16	12,1–24	16,1–32	20,1–40
V – очень грязный	>16	>24	>32	>40

Степень загрязнения поверхностных вод (акваторий военно-морских баз) определяется превышениями загрязняющих веществ, их предельно допустимых концентраций, в соответствии с табл. 2.

При загрязнении почв степень загрязнения рекомендуется выражать суммарным показателем загрязнения Z_c [1]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_i - (n-1), \quad (2)$$

где $K_i = \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}$, или $K_i = \frac{C_i}{C_{\text{ф}i}}$, ($C_{\text{ф}i}$ – среднефоновое содержание i -го загрязняющего вещества, или значение Кларка).

Критерии оценки загрязнения почвы представлены в табл. 3.

Таблица 2

Оценки загрязнений водной среды

Превышения ПДК для тяжелых металлов, токсикантов, радиоактивности	Логическая операция объединения уровней загрязнения	Превышения ПДК для нефтепродуктов и АХОВ	Логическая операция объединения уровней загрязнения	Превышения ПДК для нитратов, нитритов, фосфатов	Категория качества водной среды по загрязняющим веществам
До 1 ПДК	и/или	До 1 ПДК	и/или	До 1 ПДК	Относительно чистая
От 1 до 2 ПДК	и/или	От 1 до 3 ПДК	и/или	От 1 до 2 ПДК	Умеренно загрязненная
От 2 до 5 ПДК	и/или	От 3 до 10 ПДК	и/или	От 2 до 3 ПДК	Загрязненная
От 5 до 10 ПДК	и/или	От 10 до 50 ПДК	и/или	От 3 до 5 ПДК	Грязная
Более 10 ПДК	и/или	Более 50 ПДК	и/или	Более 5 ПДК	Очень грязная

Таблица 3

Критерии оценки загрязнения почвы

Суммарный показатель загрязнения почвы	Категория загрязнения почвы
1–8	Допустимое
8–16	Слабое
16–32	Среднее
32–64	Сильное
>64	Очень сильное

На карте (ситуационной схеме) следует нанести границы загрязнения акватории и земель при различных уровнях превышений ПДК, ПДУ и качественных оценках категорий загрязнения.

Влияние загрязнения природной среды на здоровье личного состава и населения. Оценивание риска для здоровья личного состава и населения в зоне ответственности войск (сил) при воздействии загрязняющих веществ, регистрируемых на территории воинской части, проводится, если их концентрация в компонентах природной среды превышает предельно допустимые уровни (ПДК). Для таких загрязняющих веществ коэффициенты опасности рассчитываются из выражений [2]:

$$K_{\text{оп}} = \frac{\bar{D}}{D_{\text{реф}}}, \text{ или } K_{\text{оп}} = \frac{\bar{C}}{C_{\text{реф}}}, \quad (3)$$

где \bar{D} , \bar{C} – средняя доза [мг/кг] или средняя концентрация [мг/м³] химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов, обусловленная контактом организма с веществом в результате ингаляционных воздействий, накожной экспозиции и потребления пищи;

$D_{\text{реф}}$, $C_{\text{реф}}$ – референтная (безопасная) доза [мг/кг] или референтная (безопасная) концентрация [мг/м³]. Поступление химических веществ обычно рассчитывается по формулам, учитывающим воздействующие концентрации, величину контакта, частоту и продолжительность воздействий, массу тела и время осреднения экспозиции. Референтные значения приведены в [2].

При использовании логист-модели зависимость «доза – эффект» может определяться формулой следующего вида:

$$R = \frac{1}{1 + \exp[-\alpha(\ln K_{on} - 1) + \beta]}, \quad (4)$$

где α , β – коэффициенты модели, $\alpha > 0$.

В табл. 4 приведены определения степени риска [2], его оценка в баллах и рекомендации по снижению риска.

Таблица 4

Оценка риска негативного воздействия химических веществ на здоровье человека

Диапазон риска	Наименование	Мероприятия по снижению риска	Оценка в баллах
I – $R \leq 1 \cdot 10^{-6}$	Повседневный риск	Не требуются	1
II – $1 \cdot 10^{-6} < R \leq 1 \cdot 10^{-4}$	Приемлемый риск	Постоянный контроль уровня риска	2
III – $1 \cdot 10^{-4} < R \leq 1 \cdot 10^{-3}$	Профессиональный риск	Для персонала – плановые оздоровительные мероприятия. Для населения – снижение до приемлемого риска	3
IV – $1 \cdot 10^{-3} < R$	Неприемлемый риск	Экстренные оздоровительные мероприятия по снижению риска	4

При наличии в воинской части источников ионизирующего излучения необходимо обеспечить контроль соблюдения дозы облучения как для персонала, так и для населения в соответствии с табл. 5 [3].

Таблица 5

Основные пределы доз облучения

Нормируемые величины	Пределы доз	
	персонал	население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год :		
– в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
– коже,	500 мЗв	50 мЗв
– кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

В условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения указанные пределы доз облучения в течение года установлены исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска:

$R = 10^{-6}$ – уровень пренебрежимо малого риска;

$R = 5 \cdot 10^{-5}$ – приемлемый риск для населения;

$R = 2 \cdot 10^{-4}$ – приемлемый риск для персонала.

При наличии в воинской части передающих радиотехнических объектов (ПРТО) в оценку экологической обстановки должны включаться результаты инструментального контроля уровней электромагнитных полей на селитебной территории, внутри жилых, общественных и производственных помещений [4].

Удовлетворительной считается обстановка, при которой не регистрируются превышения предельно допустимых уровней ЭМП диапазона частот 30 кГц – 300 гГц для населения, приведенных в табл. 6.

Таблица 6

Предельно допустимые уровни ЭМП диапазона частот 30 кГц – 300 гГц для населения

Диапазон частот	30–300 кГц	0,3–3 мГц	3–30 мГц	30–300 мГц	0,3–300 гГц
Нормируемый параметр	Напряженность электрического поля, В/м				Плотность потока энергии, мкВт/см ²
Предельно допустимые уровни	25	15	10	3	10 25*

* Для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования.

Состояние естественных экологических систем. Состояние природных и природно-антропогенных объектов в зоне ответственности войск (сил) оценивается негативным воздействием воинской части, приводящим к нарушению природных балансов территории.

Указанные нарушения природных балансов территории могут быть малоопасными для биоты (отвалы земли, отходы V класса опасности) или опасными для биоты (являются фитотоксичными, биотоксичными). В качестве характеристик негативного воздействия предлагается определять территориальные индексы экологической безопасности I_T . Значения I_T рассчитываются как отношение площади нарушения $S_{нар}$ к общей площади зоны ответственности войсковой части S_0 , отдельно для малоопасных и опасных для биоты воздействий [5]:

$$I_T = \frac{S_{нар}}{S_0}. \quad (5)$$

Состояние природных и природно-антропогенных объектов в зоне ответственности войск (сил) оценивается в соответствии с табл. 7.

Таблица 7

Градации размеров площадей с нарушением природных балансов

Характеристика нарушений природного баланса	Значение I_T , %	Оценка нарушения природного баланса
Малоопасные для существования биоты	$I_T \leq 10\%$	Приемлемое нарушение
	$10\% < I_T \leq 30\%$	Критическое нарушение
	$I_T > 30\%$	Катастрофическое нарушение
Опасные для существования биоты	$I_T \leq 0,5\%$	Приемлемое нарушение
	$0,5\% \leq I_T \leq 1\%$	Критическое нарушение
	$I_T > 1\%$	Катастрофическое нарушение

В существующей системе органов экологической безопасности Вооруженных сил расчетно-аналитическая деятельность по оцениванию экологической обстановки должна осуществляться под руководством и при участии Региональных экологических центров (РЭЦ) военных округов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные, полученные в результате оценивания экологической обстановки, позволяют органам военного управления всех уровней формировать эффективную систему управления обеспечением экологической безопасности Вооруженных сил. Принципы, на которых должна строиться система управления обеспечением экологической безопасности ВС РФ, изложены в статье [6].

Список используемых источников

1. Проект РД 52. Методика оценки экологической обстановки на территории военного объекта. – М., 1998.
2. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – URL: <http://www.gosthelp.ru/text/r2110192004rukovodstvopoo.html> (дата обращения: 15.04.2018).
3. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. – М., 2009.
4. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. – М., 2003.
5. Временные рекомендации по оценке экологической опасности производственных объектов [утв. Госкомэкологии РФ 15.03.2000 г.]. – М., 2000.
6. *Кулешов Ю.В., Летучий Ю.А.* Пути развития экологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации // Военная мысль. – 2014. – №1. – С. 3–9.

Ю.А. Летучий*,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Новиков*,
кандидат техн. наук;
А.С. Тимощук*,
кандидат техн. наук;
П.В. Шабалин*

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

ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОИНСКИХ ЧАСТЕЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Авторами предложены пути решения задачи формирования эффективной системы управления в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности Вооруженных сил Российской Федерации.

Ключевые слова: экологическая безопасность, охрана окружающей среды, ВС РФ.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач обеспечения экологической безопасности Вооруженных сил Российской Федерации является формирование эффективной системы управления в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности. Авторами предложены пути решения этой задачи на современном этапе.

Предложения ориентируются на существующую структуру органов экологической безопасности ВС РФ и сводятся к следующим рекомендациям:

1. Предлагается «встроить» деятельность органов военного управления всех уровней, воинских частей, должностных лиц, военнослужащих и гражданского персонала в систему управления обеспечением экологической безопасности деятельности Вооруженных сил (ОЭБД ВС), которая должна функционировать как часть общей системы управления воинским формированием.

2. «Встраивание» деятельности органов военного управления в систему ОЭБД ВС предложено осуществлять в соответствии с современными стандартами экологического менеджмента. Система экологического менеджмента строится как часть системы управления воинской части, используемой для разработки и внедрения экологической политики. Экологическая политика – это совокупность намерений и принципов относительно экологических показателей деятельности части, основанная на учете состава и технического состояния находящихся на вооружении (снабжении) образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) и реализуемая при всех видах функциональной деятельности воинской части. Сформулированная в качестве директивного документа экологическая политика создает основу для разработки подчиненными подразделениями и службами конкретных целей, задач и показателей обеспечения экологической безопасности. На основе этого документа в воинской части организуется процессный подход, рассматривающий управление экологической безопасностью как непрерывную серию взаимосвязанных управленческих функций командного состава: планирование, организация, мотивация, контроль и связующие процессы – коммуникации и принятие решений. Теоретически процессный подход представляется простым, сложности возникают как при его формальной реализации, так и при отсутствии регламентации управленческих процессов и четких показателей эффективности управления.

3. Непрерывный процесс экологического менеджмента в частях и организациях ВС РФ должен обеспечиваться квалифицированным военно-научным сопровождением специалистов военных научно-исследовательских и образовательных учреждений, профессионально занимающихся экологичностью ВВСТ и безопасностью (включая экологическую) функционирования военных объектов.

4. Эффективность системы ОЭБД ВС РФ в значительной степени определяется техническими средствами экологической безопасности и контролем за их применением. Эти средства обеспечивают:

- экологическую защиту личного состава части;
- предотвращение загрязнения окружающей среды и ликвидацию загрязнения компонентов окружающей среды;
- экологический мониторинг и контроль негативного воздействия на компоненты окружающей среды.

5. При внедрении процессного подхода к обеспечению экологической безопасности деятельности воинской части рекомендуется учитывать не только состав, особенности функционирования и размещения потенциально экологически опасных военных объектов (ПЭОВО) на территории военной экологической системы, но и региональные особенности окружающей среды в экологической системе более высокого уровня (города, области, региона). Внедрение процессного подхода осложняется тем, что в стандартах [1–3] не дана конкретная система действий при его реализации.

В настоящей публикации предпринята попытка определить составляющие (элементы) деятельности воинской части, которые могут влиять на обеспечение экологической безопасности и состояние окружающей среды и должны быть включены в содержание экологической политики, а также отслеживаться при осуществлении процессного подхода к управлению экологической безопасностью. В стандартах [1–3] эти элементы определены как экологические аспекты, управление которыми входит в систему экологического менеджмента и по которым оценивается экологическая эффективность управления. Для нас аспекты рассматриваются как элементы повседневной деятельности части (организации), влияющие на ее экологическую безопасность.

Воинская часть должна разработать, внедрить и поддерживать следующие процедуры:

- а) идентификацию экологических аспектов своей деятельности, которые она может контролировать и на которые она может влиять;
- б) выявление тех аспектов, которые оказывают или могут оказывать значимые воздействия на состояние окружающей среды и экологическую безопасность.

Оценивание экологической эффективности (ОЭЭ) рассматривается как внутренний процесс управления, использующий показатели, представляющие информацию, позволяющую сравнить прошлую и настоящую экологическую эффективность воинской части с критериями этой эффективности.

Показатели ОЭЭ подразделяются на две категории:

- показатели экологической эффективности (ПЭЭ);
- показатели состояния окружающей среды (ПСОС).

ПЭЭ, в свою очередь, подразделяются на два типа:

- показатели эффективности управления (ПЭУ), обеспечивающие получение информации об усилиях, предпринимаемых руководством с целью воздействия на экологическую эффективность воинской части;
- показатели эффективности функционирования (ПЭФ), обеспечивающие получение информации об экологической эффективности функционирования воинской части.

ПСОС дают представление о фактическом или потенциальном воздействии на окружающую среду экологических аспектов деятельности и тем самым способствуют планированию и внедрению ОЭЭ.

Система показателей экологической эффективности деятельности воинских частей и организаций представлена на рис. 1

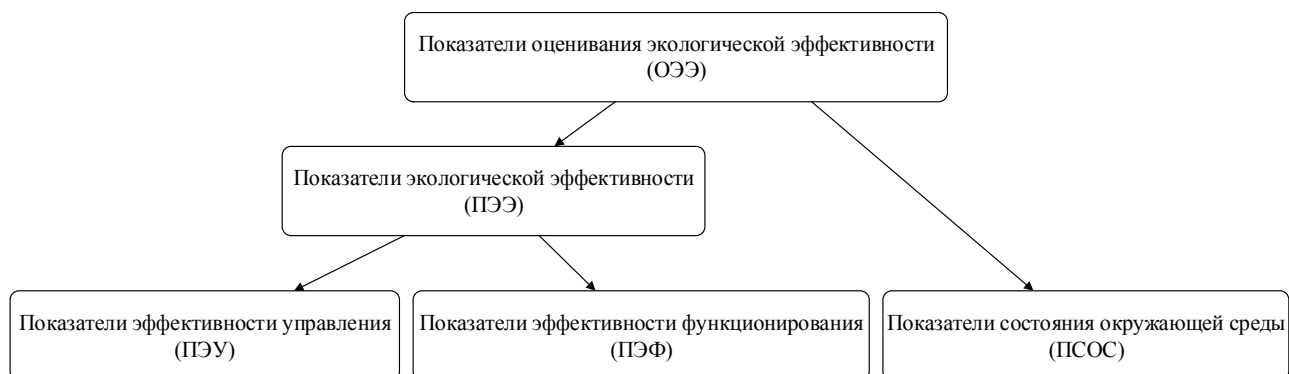


Рис. 1. Система показателей экологической эффективности деятельности воинских частей и организаций

Сформулируем, по возможности, полный перечень экологических аспектов, который может быть использован во внутреннем процессе управления воинской части под названием ОЭЭ с учетом введенных категорий показателей оценивания. Для того чтобы сформировать ПЭУ, необходимо выделить значимые аспекты, связанные со следующим:

- планированием учений, других мероприятий боевой подготовки и повседневной деятельности, с учетом требований по охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности;
- постоянным контролем за техническим состоянием и эксплуатацией ВВСТ, инфраструктурой воинской части;
- управлением материально-техническим обеспечением на этапах поступления, хранения и транспортирования;
- управлением снабжением энергией с точки зрения экономии и рационального использования;
- управлением отходами в части уменьшения количества, безопасного временного хранения и передачи региональному оператору;
- разработкой регламента оценивания и предупреждения воздействий от повседневной деятельности на различные компоненты окружающей среды, здоровье личного состава и гражданского населения;
- предупреждением и ограничением последствий нештатных происшествий;
- информированием личного состава и персонала, их обучением и участием в решении вопросов, связанных с окружающей средой и экологической безопасностью.

Анализ данных в виде количественных или качественных показателей, определенных в экологической политике части (организации) и основанных на значимых аспектах ее деятельности за определенный период (квартал, год), преобразуется в информацию, определяющую ПЭУ.

Для того чтобы сформировать ПЭФ воинской части, необходимо выделить значимые аспекты ее деятельности, связанные с обеспечением следующих видов безопасности:

- биологической;
- механической;
- промышленной;
- термической;
- химической;
- электрической;

- пожарной;
- взрывоопасности;
- ядерной и радиационной;
- психофизиологической;
- электромагнитной совместимости;
- воздействия химических и загрязняющих веществ;
- воздействия акустических, инфракрасных и световых волн;
- эксплуатации и утилизации машин и оборудования;
- эксплуатации строений, сооружений и территорий;
- воздействия техногенных сред.

При анализе данных в виде количественных или качественных показателей, определенных в экологической политике части (организации) и основанных на значимых аспектах ее деятельности за определенный период (квартал, год), формируется информация, связанная с количеством зарегистрированных отклонений от утвержденных регламентов деятельности, приводящим к отклонениям от требований безопасности и устойчивого функционирования, нештатным происшествиям и чрезвычайным ситуациям с экологическими последствиями. Эта информация определяет ПЭФ воинской части.

ПСОС направлены на снижение негативного воздействия воинской части на компоненты природной среды, личный состав и население.

Сведения о негативном воздействии воинской части на компоненты природной среды должны представляться в соответствии с правилами [4] и включать:

- а) сведения о стационарных источниках выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух с указанием их географических координат;
- б) сведения об уровне и(или) объеме или о массе выбросов загрязняющих веществ в отношении каждого стационарного источника выбросов загрязняющих веществ в атмосфере;
- в) сведения об источниках сброса загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты (мест сброса сточных вод) с указанием их географических координат;
- г) сведения об уровне и(или) объеме или о массе сбросов загрязняющих веществ в отношении каждого источника сбросов загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты;
- д) сведения об объеме или о массе размещенных отходов производства и потребления, в том числе по каждому виду и классу опасности отходов.

Указанные сведения определяют номенклатуру загрязняющих веществ, которые необходимо контролировать в компонентах природной среды. Если ПЭОВО, функционирующие в воинской части, оказывают незначительное воздействие на ОС (III категория объекта), допустимо ограничиться расчетными методами определения концентрации загрязняющих веществ в компонентах окружающей природной среды. Если воинская часть оказывает умеренное воздействие на ОС (объект относится ко II категории), расчетные методы могут сопровождаться инструментальными измерениями уровня загрязнения. Основаниями для проведения инструментальных измерений являются:

- а) предписания природоохранных организаций;
- б) неудовлетворительное состояние природоохранных сооружений и устройств;
- в) положения разработанной командованием экологической политики воинской части, формирования.

Количественные и качественные показатели состояния окружающей среды представлены в статье «Оценивание экологической обстановки на объектах Вооруженных сил Российской Федерации», помещенной в настоящем сборнике Трудов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

Вывод. По мнению авторов данной статьи, использование предложенных показателей в процессе управления экологической безопасностью воинской части будет способствовать

формированию эффективной системы управления обеспечением экологической безопасности ВС РФ.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – М., 2016.
2. ГОСТ Р ИСО 14004-2016. Системы экологического менеджмента. Общее руководство по принципам, системам и методам обеспечения функционирования. – М., 2016.
3. ГОСТ Р ИСО 14031-2016. Системы экологического менеджмента. Оценка экологической эффективности. Руководство по оценке экологической эффективности. – М., 2017.
4. Об утверждении правил создания и ведения государственного реестра объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду: постановление Правительства Российской Федерации от 23.06.2016 г. №572. – URL: <http://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-23062016-n-572/> (дата обращения: 12.02.2018).

В.В. Удриш

Гидрометеорологическая служба Вооруженных сил Российской Федерации

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ НА БАЗЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВТОГРАФ-КЛИМАТ

Рассматриваются возможности использования аппаратно-программного комплекса Автограф-климат, одной из основных задач которого является подготовка специализированной климатической информации для автоматизированной системы гидрометеорологического обеспечения различных уровней органов военного управления Вооруженных сил Российской Федерации.

Ключевые слова: гидрометеорологическое обеспечение планирования и применения войск (сил) на театрах военных действий, специализированная климатическая информация, пространственно-временное обобщение (осреднение) гидрометеорологической информации.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап строительства и подготовки Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ) характеризуется возрастанием требований со стороны органов военного управления к предоставлению актуальной, достоверной, своевременной и всесторонней информации, необходимой для успешного решения задач управления войсками (силами). Особенно остро проблема информационного обеспечения ВС РФ встала после принятия на вооружение высокоточного оружия (ВТО) наземного, воздушного и морского базирования.

Важное значение в вопросах достижения информационного превосходства над противником отводится превентивным действиям на стратегических (операционных) направлениях (потенциальных театрах военных действий) уже в мирное время. Среди всех видов информационных ресурсов, предоставляемых органам военного управления ВС РФ системой оперативного (боевого) обеспечения заметное место отводится гидрометеорологической информации (ГМИ).

Повышение значимости ГМИ в современных военных конфликтах связано с принятием на вооружение новых высокотехнологичных систем вооруженной борьбы, более чувствительных к воздействию внешних условий по сравнению с обычными (неуправляемыми) средствами огневого поражения противника. В настоящее время в системе гидрометеорологического обеспечения ВС РФ (ГМО ВС РФ) возникло определенное противоречие между возрастанием требований к ГМИ, необходимой для планирования и проведения операций на театрах военных действий (ТВД), и недостаточно полным использованием новых технологий автоматизированной обработки ГМИ. Данная ситуация не обеспечивает реализацию принципа информационной достаточности при учете всех факторов, влияющих на ведение вооруженной борьбы [1].

Возможные направления разрешения одной из составных частей данного противоречия в области ГМО ВС РФ рассмотрим на примере подготовки специализированной климатической информации на базе программно-технического комплекса Автограф-климат, принятого на снабжение в Гидрометеорологическую службу Вооруженных сил в последние годы. Три из семи режимов работы данного комплекса специально создавались для автоматизированной системы специальной климатологической обработки ГМИ и разработки климатических моделей и описаний для районов базирования и боевого применения войск (сил).

Основной целью представляемых результатов исследований является краткое рассмотрение возможностей получения специализированной климатической информации на базе программного комплекса Автограф-климат с учетом требований к ГМИ со стороны органов военного управления войсками. Одним из проблемных вопросов получения специализированной климатической информации является задача формирования гидрометеорологических архивов с исходными данными для пространственно-временного осреднения (обобщения) климатической информации с учетом ожидаемых форм и масштабов ведения военных действий.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОГРАФ-КЛИМАТ

Для применения изделия Автограф-климат необходим сервер системы данных и рабочая станция. Сервер системы данных решает задачи ведения базы данных ГМИ. Web-сервер приложений предназначен для выполнения задач обработки данных и представления информации потребителям.

Рабочая станция осуществляет прием оперативной информации, поступающей по каналам связи, проведение работ по сопровождению изделия Автограф-климат и формированию базы данных.

Оператору предоставляется возможность выбора следующих режимов работы программного комплекса Автограф-климат:

- главное меню;
- оперативные данные;
- архивные данные (исторические данные по терминологии Руководства оператору ПК [2]);
- климатические данные;
- расчетные данные;
- администрирование;
- помощь в процессе выполнения выбранного режима работы.

Остановимся на тех режимах работ, которые необходимы при формировании банка климатических данных для учета влияния ГМУ на действия войск (сил) и применения систем вооружений. Эта климатическая информация может быть получена при использовании режимов работы «климатические данные» и «расчетные данные» (разделы: «Месячные выводы», «Пользовательские задачи», «Списки станций по наблюдениям»).

Программные компоненты автоматизированной системы климатологической обработки ГМИ должны обеспечивать решение следующих задач:

- подготовки входных данных для составления климатических описаний (характеристик) районов базирования и боевого применения соединений и воинских частей на основе однородных временных рядов гидрометеорологических наблюдений по станциям, включенным в базы данных Автограф-климат;
- автоматического поиска метеорологических станций, ближайших к позиционным районам соединений и частей, районам ведения военных действий и расположения объектов огневого поражения противника;
- формирования временных рядов гидрометеорологических наблюдений и автоматического анализа их качества;
- разработки климатических таблиц и климатологических сводок по заданным районам;
- разработки специализированных климатических моделей атмосферы для заблаговременного планирования применения (стратегического, оперативного) войск (сил);
- визуализации и документирования климатической информации.

Режим «климатические данные». При выборе режима «климатические данные» предоставляется возможность просмотра на экране монитора и выбора следующих видов данных:

- метеорологических данных по станциям РФ;
- метеорологических данных по зарубежным станциям;
- аэрологических данных по станциям РФ;
- аэрологических данных по зарубежным станциям.

Для расчета климатических показателей используются архивы метеорологических (аэрологических) наблюдений, прошедшие логический контроль, для которых выполнены требования по полноте и качеству информации.

Режим «месячные выводы». Климатическая информация в режиме «месячные выводы» формируется по данным срочных наблюдений при выборе в пункте главного меню «расчетные данные» подпункта «месячные выводы».

Режим «пользовательские задачи». Режим «пользовательские задачи» позволяет проводить расчет основных статистических характеристик гидрометеорологических величин и явлений погоды на основе климатической информации общего назначения. Список задач включает несколько десятков наименований.

Программное обеспечение изделия Автограф-климат для решения задач временного и пространственного осреднения дает возможность выбора интервала дат (месяц, декада, день, часы и минуты), диапазона координат района (широта, долгота, выделяемая область, номер станции), формы представления данных, системы наблюдений.

МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РЯДОВ ПО ДАННЫМ АРХИВОВ СРОЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Основными этапами статистической обработки результатов метеорологических наблюдений являются [3]:

- формирование климатических рядов и их контроль;
- получение общей климатической информации и оценивание ее точности;
- разработка климатических показателей для прикладных целей и их расчет;
- пространственное обобщение климатической информации.

Описание и изучение климата опирается на результаты многолетних наблюдений за метеорологическими величинами, представленные в виде рядов данных, которые обобщаются за некоторые временные интервалы, преобразуются в распределения их значений по градациям с последующим вычислением небольшого количества статистических характеристик рядов.

Основу статистической обработки гидрометеорологической информации составляет применение вероятностно-статистического аппарата с учетом того, что климатические ряды обладают главными свойствами статистических совокупностей.

При статистической обработке климатические ряды рассматриваются как статистические выборки из данных генеральной совокупности гидрометеорологических наблюдений.

В процессе климатологической обработки однородных климатических рядов для ГМО ВС РФ должны быть получены следующие статистические характеристики (климатические показатели):

- 1) повторяемости и эмпирические функции распределения значений параметров гидрометеорологических условий, влияющих на деятельность войск;
- 2) характеристики распределений метеорологических величин (прежде всего первых двух центральных моментов);
- 3) экстремальные характеристики (критические значения) метеорологических величин и явлений погоды.

В процессе специализированной климатологической обработки архивной ГМИ, содержащейся в базах данных ПК Алфавит-климат, формируются климатические таблицы и климатологические сводки. Требуемая структура записи содержится в руководящем документе РД

52.21.692-2007 [4]. В каждую из таблиц заносятся статистические характеристики для одного и, реже, сочетания из двух параметров атмосферы по заданному пункту (станции, узлу сетке), физико-географической единице территории РФ и иностранных государств.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ ОСРЕДНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЙСК (СИЛ) И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Анализ исследований, выполненных во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД) и в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [5], показал, что для подавляющего большинства военных, хозяйственных и научных задач требуется климатическая информация с масштабами осреднения, представленными в обобщенном виде в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Масштабы временного осреднения климатических рядов при климатологической обработке данных для планирования применения войск (сил)

№ п/п	Период временного осреднения
1	Календарные сутки
2	День (ночь), светлая (темная) часть суток
3	Пентада
4	Декада
5	Месяц
6	Квартал
7	Сезон
8	Год
9	Пятилетка
10	Десятилетка

Таблица 2

Масштабы пространственного осреднения (обобщения) климатической информации для ГМО ВТО

№ п/п	Масштаб осреднения (обобщения)
1	Станция (пункт, аэродром, военно-морская база, объект поражения)
2	Узлы координатной сетки с заданным шагом разрешения
3	Физико-географические единицы территории Российской Федерации и зарубежных стран
4	Отдельные районы боевого применения войск (сил) и операционные направления в пределах континентальных районов
5	Океанские и морские зоны в пределах океанских районов
6	Операционно-космические зоны
7	Стратегические воздушно-космические направления
8	Воздушные направления

В большинстве режимно-справочных материалов специального назначения климатическая информация представлена в виде статистических характеристик по отдельным климатическим показателям с пространственным осреднением по метеорологическим станциям, узлам координатной сетки с заданным шагом и с осреднением по заданным регионам и срокам (ка-

лендарным суткам, декадам, месяцам, сезонам, кварталам, периодам). В то же время для ГМО заблаговременного планирования применения требуется специализированная климатическая информация по районам базирования соединений и воинских частей, а также по районам их боевого применения. Для решения задачи оценивания климатических характеристик по заданным координатам районов боевого применения используют различные методы интерполяции или прикладного климатического районирования территории стратегических (операционных) направлений (театров военных действий).

При реализации метода интерполяции осредненное поле в окрестности каждого узла может аппроксимироваться полиномами разной степени. В большинстве исследований пространственного осреднения полей метеорологических величин используют полиномы первой степени.

При автоматизации процессов пространственного осреднения метеорологических полей обычно исходят из анализа методов, уже используемых при применении неавтоматизированных расчетов, таких, как метод изолиний, метод треугольников, метод квадратов и метод полигонов.

При обобщении климатической информации по большим площадям последние разбиваются на элементы простой формы, в пределах которых располагаются не более 15–20 станций (узлов сетки), что упрощает решение задачи расчета взаимных корреляционных функций.

При автоматизации процедур пространственного осреднения метеорологических полей вводится целый ряд допущений, основным из которых является предположение об относительной однородности и изотропности поля, при которой осредняемая величина от пункта к пункту меняется сравнительно равномерно.

Одним из направлений повышения однородности осредняемых метеорологических полей является осреднение не непосредственно наблюдаемых величин, а их отклонений от норм.

Учет неоднородности и анизотропности осредняемых метеорологических полей в определенной степени может быть осуществлен при применении методов прикладного климатического районирования территорий различных масштабов (планетарного, регионального и локального уровней) с выделением однородных климатических районов по отдельным показателям или их комплексам.

Первые климатические таблицы и климатологические сводки должны разрабатываться не менее чем за 5-летний период наблюдений.

В случае учета лишь одного влияющего гидрометеорологического параметра, например метеорологической дальности видимости (МДВ) или высоты нижней границы облаков (ВНГО), из таблиц, разработанных в соответствии с руководящим документом [4], непосредственно выбираются повторяемости значений метеорологических величин ниже установленных пределов.

Для оценивания повторяемости гидрометеорологических величин различной степени сложности при наличии таблиц для одиночных параметров гидрометеорологических условий необходимо разрабатывать таблицы, включающие повторяемости (%) случаев сочетаний различных градаций, например МДВ и ВНГО, т.е. должна решаться задача объединения событий, включающих повторяемости наступления каждого из гидрометеорологических параметров по отдельности или одновременно. Для оценивания вероятностей совместного наступления двух или более событий воспользуемся аксиомой теории вероятностей для суммы элементарных событий. Тогда для вероятности совместного наступления событий МДВ и ВНГО (объединения МДВ \cup ВНГО) используется следующее соотношение:

$$P(\text{МДВ} \cup \text{ВНГО}) = P(\text{МДВ}) + P(\text{ВНГО}) - P(\text{МДВ})P(\text{ВНГО}). \quad (1)$$

Соотношение (1) выполняется при условии объединения двух независимых совместных событий. Исследования, выполненные по результатам совместных метеорологических наблюдений в аэропортах Московского аэроузла показали, что коэффициент корреляции между временными рядами МДВ и ВНГО не превышает 0,2. Это позволяет рассматривать

МДВ и ВНГО как независимые случайные величины и использовать соотношение (1) при оценивании вероятности совместного наступления двух влияющих гидрометеорологических величин.

При наступлении двух зависимых случайных событий в районах, где не подтверждается гипотеза о их независимости, для тех же гидрометеорологических параметров МДВ и ВНГО должно использоваться соотношение

$$P(\text{МДВ} \cup \text{ВНГО}) = P(\text{МДВ}) + P(\text{ВНГО}) - P(\text{МДВ}) \cdot P(\text{ВНГО}/\text{МДВ}), \quad (2)$$

где $P(\text{ВНГО}/\text{МДВ})$ – условная вероятность высоты нижней границы облаков при заданном значении МДВ.

Для оценивания вероятности совместного наступления трех независимых случайных величин, например к сумме событий $(\text{МДВ} \cup \text{ВНГО})$ добавляется третье событие «опасное явление погоды» (ОЯП), используя формулу ассоциативности элементарной теории множеств, получим следующее соотношение:

$$P((\text{МДВ} \cup \text{ВНГО}) \cup \text{ОЯП}) = P(\text{МДВ}) + P(\text{ВНГО}) + P(\text{ОЯП}) - P(\text{МДВ})P(\text{ВНГО}) - \\ - P(\text{МДВ})P(\text{ОЯП}) - P(\text{ВНГО})P(\text{ОЯП}) + P(\text{МДВ})P(\text{ВНГО})P(\text{ОЯП}). \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) используются при оценивании комплексных показателей случайных событий при ГМО задач, решаемых при оперативном планировании применения оружия и использовании технических средств в большинстве родов войск и сил.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Роль и значение климатической информации при ГМО органов управления стратегического, оперативно-стратегического и оперативного уровней Вооруженных сил Российской Федерации непрерывно возрастает в связи с увеличением значимости физико-географического фактора в современных войнах и вооруженных конфликтах. Для ГМО стратегического и оперативного планирования задач, решаемых видами Вооруженных сил и родами войск, требуется специализированная климатическая информация, которая должна охватывать все стратегические (операционные) направления ТВД.

Список используемых источников

1. Военное искусство в локальных войнах и вооруженных конфликтах. Вторая половина XX – начало XXI века / А.В. Усиков, Г.А. Барутин, В.А. Гаврилов, С.Л. Тышлаков; под общ. ред. генерал-полковника А.С. Рукшина. – М.: Воениздат, 2008. – 768 с.
2. ИМБ. 505500.0033401. Руководство оператору программного комплекса «Автограф-климат». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 257 с.
3. Климатология / О.А. Дроздов, В.А. Васильев, Н.В. Кобышева и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
4. РД 52.21.692-2007. Требования к составлению климатического описания аэродрома. – М., 2007. – 38 с.
5. Анисимова Т.Н., Кобышева Н.В., Тарановская В.Н. Требования к климатической информации и ее публикации в справочных изданиях // Труды ВНИИ ГМИ-МЦД. – 1979. – Вып. 63. – С. 10–26.

А.Б. Успенский,
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБУ НИЦ «Планета», г. Москва

РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Дано краткое описание атмосферных ИК-зондировщика ИКФС-2 и МВ-зондировщика МТВЗА-ГЯ полярно-орбитальных метеоспутников серии «Метеор-М», а также технологий обработки спутниковых измерений для получения данных температурно-влажностного зондирования атмосферы. Сообщаются результаты усвоения данных МТВЗА-ГЯ в моделях численного прогноза погоды Гидрометцентра России.

Ключевые слова: спутниковые системы, дистанционное зондирование атмосферы, ИК-зондировщик, МВ-зондировщик, метеоспутник «Метеор-М»

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и применение аппаратуры и технологий дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА) – важнейшее направление развития космических наблюдательных систем гидрометеорологического назначения. Определяющим фактором при этом являются требования пользователей спутниковой гидрометеорологической информации, в соответствии с которыми метеорологические спутники должны оперативно поставлять данные о термодинамических параметрах и составе атмосферы. Согласно требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО) для целей глобального численного прогноза погоды (ЧПП) спутниковые оценки профилей температуры в тропосфере и нижней стратосфере должны иметь погрешность не более 1К и вертикальное разрешение около 1 и 2 км соответственно; точность оценок профилей относительной влажности в тропосфере должна быть не хуже 10 % при вертикальном разрешении 1-2 км.

Выходные продукты ДЗА и, в частности, данные температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА) уже в настоящее время существенно дополняют данные наземной наблюдательной сети, а в будущем должны стать основными в информационном обеспечении ЧПП, мониторинга климатических изменений и изучения процессов атмосферной химии [11, 12, 17].

В состав бортового информационного комплекса КА серии «Метеор-М» [1] включена аппаратура ДЗА – впервые установленный на борту КА «Метеор-М» №2 гиперспектральный ИК-зондировщик ИКФС-2 (инфракрасный фурье-спектрометр) и микроволновый (МВ) радиометр МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы). Создание зондировщиков ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ, предназначенных для получения данных ТВЗА и аналогичных по своему назначению аппаратуре современных зарубежных оперативных метеоспутников (серий NOAA, Metop, JPSS), является значительным достижением отечественного космического приборостроения.

Следует отметить, что в соответствии с Федеральной космической программой России 2016–2025 годов планируется запустить 4-5 однотипных КА серии «Метеор-М» с зондировщиками ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ на борту, чтобы обеспечить непрерывное функционирование отечественной системы ДЗА на основе группировки из двух КА: один – на утренней орбите, второй – на послеполуденной.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРНЫХ ИК- И МВ-ЗОНДИРОВЩИКОВ СПУТНИКОВ «МЕТЕОР-М», ИНФОРМАЦИОННАЯ ПРОДУКЦИЯ

Технические характеристики фурье-спектрометра ИКФС-2 [5]. Рабочий спектральный диапазон 5–15 мкм ($660\text{--}2000\text{ см}^{-1}$); спектральное разрешение $0,4\text{--}0,7\text{ см}^{-1}$; уровень случайных погрешностей измерений $0,15\text{--}0,4\text{ мВт/ (м}^2\text{ ср см}^{-1}\text{)}$; полоса обзора 1000–2500 км; пространственное разрешение в надире 35 км. Спектр уходящего ИК-излучения, регистрируемый с помощью ИКФС-2, содержит 2700 каналов. Бортовая радиометрическая калибровка выполняется периодически с использованием измерений излучения космоса (нулевое излучение в ИК области спектра) и имитатора абсолютно черного тела при известной температуре. Спектральная калибровка (привязка к шкале волновых чисел) выполняется с использованием референсного лазера (также входит в состав прибора).

По ряду технических характеристик и области применения прибор ИКФС-2 соответствует зарубежным аналогам – интерферометрам IASI/ Metop, CrIS / JPSS [1, 12], но в сравнении с ними имеет худшее пространственное разрешение (35 км вместо 12–14 км) и более узкий рабочий спектральный диапазон (не включает коротковолновую область 3,7–5,0 мкм, где расположены полосы поглощения ряда атмосферных газов).

Главной целевой функцией ИКФС-2 является получение данных ТВЗА улучшенного вертикального разрешения в атмосферном слое от поверхности Земли до 10 гПа при отсутствии облачности в поле зрения прибора. Измерения ИКФС-2 позволяют также определять общее содержание различных атмосферных газовых компонент, в том числе озона, метана, двуокиси азота, диоксида углерода.

Технические характеристики МТВЗА-ГЯ. Микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ [3] имеет 29 каналов с рабочими частотами в окнах прозрачности атмосферы 10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,7; 42; 48 и 91 ГГц (сканер), а также в полосе поглощения кислорода 52–57 ГГц (температурное зондирование) и линии поглощения водяного пара 183 ГГц (влажностное зондирование). Полоса обзора прибора составляет 1500 км, пространственное разрешение – 16–198 км (в зависимости от радиометрического канала), диапазон частот – 10,6–183,3 ГГц; погрешность измерения радиояркостной температуры – 0,5–1,5 К. Схема кругового конического сканирования МТВЗА-ГЯ позволяет производить визирование в направлении кормы КА. Угол визирования составляет $53,3^\circ$, а угол падения 65° . Бортовая калибровка радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ для определения шкалы антенных температур проводится на каждом скане вне зоны рабочего сектора по двухточечной схеме с использованием измерений излучения космического пространства и эталонного излучателя.

По области применения прибор МТВЗА-ГЯ (МВ-сканер/зондировщик) соответствует микроволновым зондировщикам AMSU-A, MHS (спутники серий NOAA, Metop) и сканеру/зондировщику SSMIS спутника DMSP-F16-19, см [13].

Главной целевой функцией МТВЗА-ГЯ является получение данных ТВЗА, т.е. оценок вертикальных профилей температуры и влажности в атмосферном слое от поверхности Земли до 5 гПа при наличии и отсутствии облачности в поле зрения прибора. Результаты ТВЗА, будучи «всепогодными», имеют относительно малое вертикальное разрешение (в пределах 3–6 км).

Технологии получения данных ТВЗА по информации спутниковых атмосферных ИК- и МВ-зондировщиков достаточно хорошо отработаны в нашей стране и за рубежом [2, 7, 11, 12, 16]. С середины 1980-х годов указанные продукты оперативно производились по данным спутников серий NOAA и Метеор, причем по уровню погрешности и вертикальному разрешению они заметно уступали данным аэрологического зондирования. В НИЦ «Планета» на протяжении многих лет велись работы по созданию систем ТВЗА, использующих данные зарубежных КА серий NOAA, Metop. После запуска КА «Метеор-М» № 2 в НИЦ «Планета» (вместе с кооперацией – ФГУП ГНЦ «Центр Келдыша», СПбГУ, ИВМ и МГ СО РАН) были разработаны и внедрены две технологии получения данных ТВЗА. Первая технология обес-

печивает получение продуктов ТВЗА по данным ИКФС-2 только при отсутствии облачности в поле зрения прибора, а вторая – по измерениям МТВЗА-ГЯ независимо от наличия или отсутствия облачности в поле зрения прибора.

Следует отметить, что важным элементом технологий обработки данных ИК- и МВ-зондировщиков являются программные комплексы быстрых радиационных расчетов или быстрые радиационные модели (БРМ), позволяющие с высокими точностью и производительностью моделировать спутниковые измерения при заданном состоянии атмосферы. Такие БРМ были разработаны применительно к ИКФС-2 [10] и к МТВЗА-ГЯ [13], а затем в рамках сотрудничества между Росгидрометом и Евметсат для этих целей были адаптированы известные БРМ типа RTTOV (начиная с версии RTTOV v.11).

Успешная эксплуатация ИКФС-2 в течение более трех лет позволила подтвердить высокое качество (в смысле точности и стабильности радиометрической и спектральной калибровок) измеряемых спектров [6, 8] и результатов ТВЗА [2, 9]. Согласно массовым сопоставлениям с данными ближайших радиозондирований среднеквадратичная погрешность дистанционного определения температуры по данным ИКФС-2 лежит в диапазоне 1,5–3,0 К для слоя 1000–10 гПа, причем погрешность возрастает в приземном слое и нижней стратосфере. Профиль относительной влажности определяется с погрешностью меньше 20 % в слое 1000–300 гПа.

Эксплуатация МТВЗА-ГЯ на борту КА «Метеор-М» №2 выявила необходимость внешней калибровки прибора, так как погрешность бортовой калибровки в отдельных каналах атмосферного зондирования достигала 10–15⁰. Для получения продуктов ТВЗА НИЦ «Планета» потребовались разработка и внедрение процедуры внешней радиометрической калибровки каналов атмосферного зондирования [13, 14].

Прокалиброванные измерения МТВЗА-ГЯ использовались в технологии получения данных ТВЗА. Среднеквадратичные погрешности составляют: по температуре – в диапазоне 2–4 К, по относительной влажности – 20–25 %, что несколько уступает точности продуктов ТВЗА по данным ИКФС-2.

Наряду с получением данных ТВЗА прокалиброванные измерения МТВЗА-ГЯ в каналах атмосферного зондирования использовались для численных экспериментов по их усвоению в схеме краткосрочного численного прогноза погоды Гидрометцентра России.

СПУТНИКОВЫЕ ИК - И МВ-ЗОНДИРОВЩИКИ И ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

В современных моделях ЧПП усваиваются спутниковые наблюдения температуры, влажности, ветра (вертикальные распределения в атмосфере) и других метеопараметров. В отличие от контактных наблюдений спутниковые атмосферные зондировщики не обеспечивают прямых измерений атмосферных параметров, а измеряют излучение (радиацию), производимое или отраженное системой «атмосфера – поверхность».

Согласно оценкам [15], выполненным в Метеослужбе Великобритании, наибольший вклад в уменьшение погрешности прогноза на 24 ч дают данные ИК- и МВ-зондировщиков. Этот вклад составляет 78 % от общего вклада спутниковых наблюдательных систем (вклад аэрологического зондирования – не больше 15 %), причем 43 % приходится на МВ-зондировщики (AMSU-A, MHS) и 35 % – на ИК-зондировщики (IASI, AIRS, HIRS). Вклад имаджеров (типа AVHRR, MODIS) не превышает 10 %, скаттерометров (поля приводного ветра) – не более 5 %, а данных радиопросвечивания – около 4 %. Применительно к одному спутнику Metop наиболее ценным для целей ЧПП является ИК-зондировщик IASI (49 % вклада), далее следуют МВ-зондировщик AMSU-A (31 %), скаттерометр ASCAT (13 %), МВ-зондировщик MHS (3 %), ИК-зондировщик HIRS (2 %) и аппаратура радиопросвечивания GRAS (2 %).

Отметим, что последние годы в системах глобального усвоения данных ведущих мировых прогностических центров, в том числе Гидрометцентра России, используют непосредственно

данные измерений спутниковых атмосферных зондировщиков (вместо результатов ТВЗА) [4, 12, 16]. Основная причина таких технологических изменений – необходимость адекватного описания погрешностей данных, подлежащих усвоению. Погрешности спутниковых измерений гораздо легче количественно оценить, чем погрешности данных ТВЗА.

Информативность измерений МТВЗА-ГЯ в пяти «тропосферных» и одном «нижне-стратосферном» каналах температурного зондирования исследована Гидрометцентром России и НИЦ «Планета» [4] путем оценки вклада этих измерений в систему глобального усвоения данных Гидрометцентра России (сравнительно с вкладом других видов наблюдений). Численные эксперименты с использованием разработанных процедур коррекции смещений и контроля качества спутниковых данных показали, что в Северном полушарии эффект от усвоения данных МТВЗА-ГЯ нейтральный. В Южном полушарии эффект усвоения данных МТВЗА-ГЯ ощутимо положительный, в частности, среднеквадратичная погрешность трехсуточного прогноза геопотенциальной высоты на поверхности 500 гПа составляет в базовой конфигурации 52 м, а с добавлением наблюдений МТВЗА-ГЯ – 46 м (т.е. улучшение составляет 12 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено современное состояние отечественных спутниковых систем ДЗА на базе полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М». Созданные в последние годы спутниковая целевая аппаратура (ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ) и технологии обработки спутниковых данных обеспечивают оперативное получение основного выходного продукта ДЗА – оценок вертикальных профилей температуры и влажности в атмосфере. Приемлемые точностные характеристики этого выходного продукта уже сейчас позволяют дополнять данные наземной сети аэрологического зондирования (что особенно существенно для территорий с редкой сетью наземного зондирования). Дальнейший прогресс в этом направлении связывается с совершенствованием технологий тематической обработки спутниковых данных, в частности, созданием эффективных процедур детектирования и учета облачных образований при получении выходных продуктов (на основе комплексирования спутниковых ИК и микроволновых измерений, привлечения спутниковых данных более высокого пространственного разрешения).

Вторая из рассмотренных областей применения данных ДЗА – информационное обеспечение схем ЧПП. Запуск и эксплуатация отечественной аппаратуры ДЗА (на КА «Метеор-М» № 2) позволили приступить к разработке технологий усвоения данных спутниковых измерений в схемах ЧПП. На основе накопленного опыта работы с данными зарубежных МВ-зондировщиков в Гидрометцентре России (совместно с НИЦ «Планета») разработана и успешно испытана технология использования данных МТВЗА-ГЯ в системе глобального усвоения данных – составной части схемы глобального ЧПП. Значимый положительный эффект усвоения данных МТВЗА-ГЯ свидетельствует о необходимости дальнейшего развития и совершенствования созданных технологий путем увеличения количества усваиваемых каналов, усвоения измерений, «искаженных» облачностью и т.п. Важным для успешного применения измерений указанного состава является также совершенствование самой аппаратуры МТВЗА-ГЯ в части разработки более точной процедуры бортовой радиометрической калибровки.

Стоит отметить в заключение, что в настоящее время в Гидрометцентре России (совместно с НИЦ «Планета») ведутся работы по созданию технологии усвоения данных ИКФС-2 в схеме глобального ЧПП. При этом, в отличие от данных МТВЗА-ГЯ, не нужно разрабатывать процедуру внешней радиометрической калибровки, но требуется выделить ограниченное подмножество «оптимальных» для усвоения каналов (не более 100), а также создать эффективную процедуру фильтрации облачности.

Список используемых источников

1. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» / В.В. Асмус, В.А. Загребаев, Л.А. Макриденко и др. // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 12. – С. 5–16.
2. Температурное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК фурье-спектрометра ИКФС-2 / В.В. Асмус, Ю.М. Тимофеев, А.В. Поляков и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 53, № 4. – Р. 487–492.
3. Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ КА «МЕТЕОР-М» №1 / В.В. Болдырев, Н.Н. Горобец, П.А. Ильгасов и др. // Вопросы электромеханики. – 2008. – Т.107. – С. 22–25.
4. Численные эксперименты по использованию измерений спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России / Д.Р. Гайфулин, М.Д. Цырульников, А.Б. Успенский и др. // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 9. – С. 36–47.
5. Бортовые инфракрасные фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли / Ю.М. Головин, Ф.С. Завелевич, А.Г. Никулин и др. // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 6. – С. 25–37.
6. Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: результаты эксплуатации на борту метеоспутника «Метеор-М» № 2 / Ю.М. Головин, Ф.С. Завелевич, Д.А. Козлов и др. // Исследование Земли из космоса. – 2017. – № 4. – С. 88–100.
7. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 5. – С. 3–10.
8. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. Анализ измерений спектров уходящего излучения / А.В. Поляков, Ю.М. Тимофеев, Я.А. Виролайнен и др. // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 5. – С. 71–78.
9. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. Валидация результатов температурного зондирования атмосферы // А.В. Поляков, Ю.М. Тимофеев, А.Б. Успенский и др. // Исследование Земли из космоса. – 2018. – № 1. – С. 81–90.
10. Быстрая модель радиационного переноса для анализа данных гиперспектрального ИК-зондировщика спутников серии «Метеор-М» / А.Н. Рублев, А.Б. Успенский, В.П. Пяткин, Е.В. Русин // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 6. – С. 16–24.
11. Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н. Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исследование Земли из космоса. – 2005. – № 5. – С. 18–33.
12. Успенский А.Б., Рублев А.Н. Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования // Исследование Земли из космоса. – 2013. №6. – С.4–15.
13. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ / А.Б. Успенский, В.В. Асмус, А.А. Козлов и др. // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 5. – С. 57–70.
14. Gayfulin D., Tsyruльников M. and A. Uspensky. Assessment and Adaptive Correction of Observations in Atmospheric Sounding Channels of the Satellite Microwave Radiometer MTVZA-GY // Pure and Applied Geophysics. – June 2018.
15. Joo S., J. Eyre and R. Marriott. The Impact of MetOp and Other Satellite Data within the Met Office Global NWP System Using an Adjoint-Based Sensitivity Method // Mon. Wea. Rev. – 2012. – Vol. 14. – P. 3331–3342.
16. Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice // Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics. – Singapore: World Scientific Publishing, 2000. – Vol. 2. – 253 p.
17. Smith W.L. Atmospheric soundings from satellites—false expectations or the key to improved weather prediction // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 1991. – Vol. 117. – P. 267–297.

Procedures for analyzing of cloudiness spatial distribution in composition of the technology of actual base geodata formation / I.N. Andrianov, A.N. Grigoryev, G.G. Dmitrikov, V.V. Zajcew, E.F. Chichkova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 7–12.

There are discussed the problematic question of constructing actual basic spatial data based on satellite images. Images are recorded from the spacecraft at limited time intervals. The problem is the need to analyze complex spatial distribution of clouds. It is suggested to use cloud masks. On the basis of cloud masks are performed the developed procedures for the spatial analysis of the cloudiness distribution. Procedures allow to evaluate the possibility of obtaining a qualitative result at the preliminary stages of the actual basic spatial data formation. The procedures allow to select cloudless areas on the original images. The general description of the modernized technology of formation of basic spatial data is presented. The example of using the technology to solve the problem of the regional level is shown.

Key words: remote sensing, multispectral survey, geoinformation system, base spatial data, cloud mask.

Theoretical substantiation of application of unmanned aerial vehicles in the works on modifications of supercooled fogs / S.V. Antonov, A.A. Bychkov, B.N. Sergeev, A.V. Chastuhin, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 13–17.

The article presents the results of theoretical calculations performed using numerical model "Fog Seeding" impact on performance evaluation supercooled fogs using pyrotechnic silver iodide (AgI) generators and nano-sized ice-nucleation reagent LN-212 from the unmanned aerial vehicle (UAV). Comparison the results of the modelling effects on fog made using UAV with experimental results using ground-based generators forming aerosols are given.

Key words: modifications of supercooled fogs, efficiency of modifications of supercooled fog, numerical model «Fog Seeding».

Artjushina A.V., Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M. Simulation of brightness fields of inhomogeneous cloudness in solar and IR ranges for different schemes of passive satellite sensing: Algorithms and some results // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 18–21.

The paper presents original statistical algorithms developed within the framework of the MA-THART package for modeling the process of solar and thermal radiation transfer in various atmospheric conditions, including inhomogeneous deterministic and stochastic clouds. Examples of their use for solving some problems of atmospheric optics are given.

Key words: solar and thermal radiation, Monte Carlo algorithms, brightness fields, deterministic and stochastic clouds.

Modeling of seasonal and long-term variability snow cover of southern federal districts of Russia / B.A. Ashabokov, L.A. Kesheva, G.M. Kruchenitsky, A.A. Tashilova, R.A. Shokuev // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 22–25.

Seasonal and long-term variability of the thickness of the snow cover for the southern regions of Russia are analyzed. The hypothesis of influence parametric resonance with the minimum frequency of tidal vibrations on the long-term variability of the thickness of the snow cover has been tested. The parameters of the fields of climatic norms for the thickness of the snow cover for the South of Russia are calculated. It is shown that taking into account the influence of slow tidal vibrations on

the thickness of the snow cover leads to the disappearance of the positive trend for the values of this parameter averaged over the region.

Key words: snow cover, seasonal variability, long-term variability, trends, long-period tidal fluctuations.

Bova Y.I., Kryukovsky A.S., Lukin D.S. Numerical simulation of a radio signal in an anisotropic medium taking into account deflecting absorption by the method of bicharacteristics // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 26–32.

Numerical sim carried out. The projections of the rays onto different coordinate planes are considered: to the propagation plane and the lateral plane. The absorption of the radio wave and the divergence along the rays and the influence of these factors on the attenuation of the amplitude of the radio signal are studied. Calculations are performed for the day model of the electron concentration of a high-latitude ionospheric plasma. The results of calculations in the case of ordinary and extraordinary waves are compared.

Key words: propagation of radio waves in ionosphere, numerical simulation.

Drobashevskaya E.A., Pogoreltsev A.I., Smyshlyaev S.P. Extratropical stratosphere response to ENSO events during springtime transition // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 33–36.

A of the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on the temperature and ozone in the extratropical regions during the springtime transition was performed. It was established that under La Niña conditions, the interannual variability of temperature and ozone mixing ratio in the stratosphere is stronger than under El Niño conditions, which indirectly indicates higher activity of dynamic processes.

Key words: stratospheric ozone, springtime transition, ENSO, SPW.

The global electric field variations in the ground atmosphere simulation / A.G. Klovo, G.V. Kupovykh, S.S. Svidelskiy, D.V. Timoshenko // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 37–41.

The electric field in the electrode layer due to the global electric current variation space-time distribution simulation results are presented. Under the conditions of the classical electrode effect near the earth's surface, oscillations occur synchronously, differing in the amplitudes of the perturbations of the electric field at different heights. In the presence of turbulent mixing in the surface atmosphere, there is additionally a phase shift of the electric field oscillations relative to the electric current density.

Key words: modeling, electric field, electric current, atmosphere, surface layer, turbulence, electrode layer.

Kostromitinov A.V., Rud M.Y. The model of the cyclone cloud represent based on the set-theoretic approach to the hydrometeorological target spacecraft data structure description // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 42–47.

The model of the cyclone cloud represent is described in the article. The model allows to use hydrometeorological target spacecraft data to obtain numerical characteristics of cyclonic cloud spirals for their subsequent use in the diagnosis of the geopotential field in areas poorly lit by aerological observations. The model is based on the set-theoretic approach to the analysis of cyclone cloud fields, viewed in images of the earth's surface from space. The using of the model allows to ap-

proach the diagnosis of hydrometeorological conditions from the position of ensuring the accuracy of the diagnosis of the geopotential field, and, consequently, from the position of increase of efficiency of functioning of specialized automated systems of hydrometeorological support.

Key words: cyclone cloud, diagnosis of the geopotential field, hydrometeorological target spacecraft.

Theoretical and experimental studies of the method of microwave sensing of the atmosphere at the compensation of the effect of background radiation / I.N. Rostokin, E.A. Rostokina, E.V. Fedoseeva, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 48–53.

The results of modeling the error of the radiocarbon measurements of the homogeneous atmosphere due to the contribution of background radiation to the antenna temperature of the microwave radiometric system at single-channel (without compensation of background noise) and two-channel difference reception (with compensation of the contribution of pH-new noise) are presented. Are shown experimental results of power measurements of radio thermal radiation of a homogeneous atmosphere multifrequency microwave radiometric system with compensation of background noise and a comparative estimation of the error without compensation and with compensation of background noise

Key words: elevation measurements, radio-brightness temperature of the atmosphere, microwave radiometric system, background noise compensation.

Study of conditions for the development of thunderstorm phenomena and development of recommendations for aviation safety / A.H. Adzhiev, M.Y. Bekkiev, A.S. Boldyrev, V.A. Kuzmin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 54–57.

A methodology for warning of a storm hazard based on measurements of the electric field strength of the atmosphere and data on lightning activity is proposed. By recording near the ground surface the gradient of the potential of the electric field of the atmosphere, one can judge the preparedness of the conditions in the cloud for the development of lightning discharges. In particular, if the fixed gradients do not exceed absolute values from -0.2 to $+0.2$ kV / m, then lightning is not fixed in the cloud. For gradient values from -0.2 kV / m. and less and at $+0.2$ kV / m. and more should be expected cloud lightning discharges, with their values of -2 kV / m. and me and at $+2$ kV / m. and more ground zippers.

Key words: electric field strength, lightning, thunderstorm, thunderstorm seeker, aviation, density of discharges per year.

Results of the initiation of artificial lightning discharges by metalized electrically conductive threads / M.N. Beytuganov, Kh.Kh. Mashukov, A.N. Pivkin, M.Kh. Tleuzheva // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 58–62.

The purpose of the research is the development, creation and experimental verification of a new effective means for initiating artificial lightning discharges based on open rocket engines (ORE). The results of full-scale tests with ORE, showing the prospects of using ORE to initiate artificial lightning in storm clouds, are presented to prevent such dangerous phenomena as ground-based lightning and as a means of delivering particles of a crystallizing reagent to clouds for cloud seeding.

Key words: storm clouds, artificial lightning, electrically conductive threads, electric field, electric discharges.

Global navigation satellite systems for monitoring the radio channels: problems and opportunities / A.M. Vesnin, S.V. Voeykov, A.V. Kiselev, G.V. Kotovich, V.I. Kurkin, A.A. Mylnikova, A.V. Oinats, L.V. Chistyakova, Yu.V. Yasyukevich // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 63–67.

In the report we consider application of global navigation satellite system signals for monitoring the radio channel in quasi-real time. We discuss arising problems. The results are presented on experimental observations from 3 paths: Khabarovsk-Tory, Magadan-Tory, Norilsk-Tory. The experimental results are based on ISTP SB RAS facilities.

Key words: ionosphere, total electron content, MUF, GPS, GLONASS, GNSS, monitoring.

The ionosphere influence on the near magnetic field polarization characteristics in the frequency range of 0.2-200 Hz models / V.F. Grigoriev, A.E. Sidorenko, E.D. Tereshchenko, P.E. Tereshchenko // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 68–72.

The results of experimental measurements of the magnetic field created by the ground source on the Kola Peninsula in the near zone are considered. During periods of geomagnetic disturbance at frequencies below 3 Hz, changes in the field amplitude were observed with respect to quiet conditions. Theoretical calculations of the magnetic field polarization characteristics are presented. They confirm the observed sensitivity of the ELF and the lower-frequency field in the near zone to the state of the ionosphere. The obtained results should be taken into account when considering the results of deep electromagnetic sounding and ionosphere monitoring using controlled sources. It is also especially important when working at extremely low frequencies in the areas with low ground conductivity.

Key words: ELF, SLF, controlled source, near zone, ionosphere.

Topside and trans ionospheric radiosounding in the Arctic with in the presence of several onboard ionosondes at different by altitudes orbits / N.P. Danilkin, G.A. Zhabankov, S.V. Zhuravlev, N.G. Kotonaeva, V.B. Lapshin, A.Y. Repin, I.V. Romanov, M.Y. Filippov, E.N. Khotenko, V.A. Shuvalov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 73–77.

Space monitoring of the Arctic ionosphere, including a continuous multi-hour monitoring of arctic inhomogeneities by the methods of oblique topside radiosounding and the method of transionospheric radiosounding is given.

Key words: ionosphere monitoring, radiosonde in the Arctic, ionosonde, spacecraft, oblique topside radiosounding.

Dashkevich Z.V., Ivanov V.E., Kozelov B.V. Auroral electron fluxes in the high-latitude atmosphere: diagnostics by optical observations // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018 – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 78–81.

The perturbation of the upper atmosphere under the action of the fluxes of auroral particles is a feature of high latitudes, which is necessary for the solution of many applied problems in this region. The report examines the diagnostics of the characteristics of the auroral electron fluxes from the data of triangulation observations of the rayed auroral forms in Apatity. A previously developed numerical model of the transport of auroral electron fluxes in the Earth's atmosphere is used. The sources of discrepancies in determining the altitude luminosity profiles and the characteristics of the electron fluxes are discussed.

Key words: high-latitude atmosphere, ionosphere diagnostics, aurora, optical observations, numerical model, triangulation.

Peculiarity the excitation of the earth-ionosphere waveguide by low-frequency source arrangement in inhomogeneous magnetoactive ionosphere / V.V. Egorov, D.A. Kobernik, V.A. Nikolskiy, V.V. Rudenko // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 82–86.

The improvement methodics for analytical evaluation of electromagnetic fields with their polarization disturbed by SLF and VLF ionosphere source in inhomogeneous magnetoactive ionosphere. For problem solution used the model of plane layered ionosphere with the components of tensor dielectric permittivity which may be extrapolate as exponents for regions above and below of 100 km. The formulas have been obtained for field amplitude in the waveguide.

Key words: earth-ionosphere waveguide, inhomogeneous magnetoactive ionosphere, SLF and VLF ionosphere source.

The affect of charged particle concentration perturbation on ultra-wideband electromagnetic signal propagation in ionospheric plasma / S.A. Zhelavskiy, D.A. Kobernik, N.V. Lebedev, S.A. Nazarov, V.A. Nikolskiy, V.V. Rudenko // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 87–91.

Considered the results for ionospheric plasma perturbation from heating facility HAARP and nuclear explosion are obtained.

Key words: ultra-wideband electromagnetic pulse, propagation, ionospheric plasma, perturbation, charged particle concentration, dispersion, heating facility, nuclear explosion.

Early warning of cloud-to-ground lightning events based on data of lightning detection network and electric field sensor / A.H. Adzhiev, I.A. Gotur, I.I. Kononov, E.A. Korovin, Y.V. Kuleshov, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 92–96.

In this paper, the data of the thunderstorm activity monitoring and the electric field sensor were analyzed to determine characteristics of the cloud-to-earth type lightning automatic warning algorithm.

Key words: lightning detection systems, electric field meter, lightning discharge, automatic warning.

Bekkiev K.M., Shapovalov A.V. Calculations to study the attenuation of IR radiation in a cloud environment // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 97–101.

Calculations of microstructural characteristics of convective clouds using a three-dimensional numerical model are carried out. The characteristics of the cloud at different stages of development are investigated. Using the functions of droplet and crystal size distribution obtained in numerical experiments, the attenuation, absorption, and scattering of electromagnetic radiation in a cloud environment are calculated.

Key words: convective clouds, particle spectra, absorption and scattering, numerical model, infrared radiation.

Bryukhanov I.D. Problem of interpretation of data on polarization laser sensing of aircraft condensation trails: Estimation of meteorological parameters // Proceedings of the Mozhaisky Military

Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 102–106.

To establish the mechanisms of formation of oriented ensembles of crystalline particles in aircraft condensation trails, information on the meteorological state of the atmosphere is needed. In the present work, meteorological parameters measured by sounding balloons and civilian aircrafts, as well as data calculated using the ECMWF and GFS models, are analyzed comparatively. Conclusions about the applicability of the data, which are obtained using each of the specified sources, for interpreting the results of the experiments performed on the lidar developed at NR TSU are made.

Key words: aircraft trail, laser sensing, polarization lidar, backscattering phase matrix.

Bryukhanov I.D., Zuev S.V., Samokhvalov I.V. Results of the experimental investigation of microphysical properties of cirrus and solar radiation fluxes near the Earth's surface // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 107–111.

Results of a complex experiment on the investigation of optical and microphysical characteristics of cirrus with simultaneous measurements of solar radiation fluxes near the Earth's surface, which lasts more than a year, are discussed. Data processing shows that cirrus contain quite often the layers of horizontally oriented crystalline ice particles. This fact has a significant effect on the transmission of solar radiation.

Key words: cirrus, polarization lidar, monitoring, crystal orientations, solar radiation.

On some results of sky observations at the panoramic optical station «Tomsky» / V.P. Galileiskii, A.I. Elizarov, D.V. Kokarev, G.G. Matvienko, A.M. Morozov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 112–116.

A brief analysis of the total annual round-the-clock observations of the sky on the panoramic optics station «TomSky» IAO SB RAS.

Key words: Cloud Field, all sky, aurora, halo, mirroring, atmospheric ice crystals, ultra wide-angle lens.

Grigoryeva O.V., Kudro D.V., Saidov A.G. Algorithm of hyperspectral data processing based on fuzzy set of clusters in the problem of classification of vegetation // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018 – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 117–123.

There are options for improving the algorithm of classification of natural landscapes by hyperspectral data, based on the application of well-known fuzzy clusterization method. Increase of the reliability and stability of the algorithm is achieved by selecting an reasonable survey period and optimal clustering parameters using the Terebige metric, the subtractive segmentation method and the particle swarm algorithm. In order to reveal the best survey period of remote sensing for the North-West of Russia we analyzed change patterns of spectral characteristics typical for this region in different vegetation phases. As an example of the algorithm implementation we show the hyperspectral data obtained from Resurs-P spacecraft at the natural reserves the Berezovye Islands (Leningrad region).

Key words: hyperspectral data, fuzzy clustering, metric of Terebige, classification, training sample, particle swarm optimization.

Denisenkov D.A., Zhukov V.Y., Shchukin G.G. About possibility of measuring of windshear to direction in doppler meteorological radio-locator // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018 – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 124–128.

An experiment is described to confirm the possibility of measuring the vertical wind shear to direction based on the analysis of spirals of small values signals spectrum width on maps of parameter distribution along the conical section obtained by DMRL. Presents the main results obtained.

Key words: meteorological radar, wind shear, spectrum width of signal.

Doronin A.P., Timoschuk A.S., Shabalin P.V. The results of a study of meteorological conditions for the formation of high levels of air pollution in Saint-Petersburg according to the data for 2017 // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 129–134.

The results of the study of meteorological conditions that influenced the formation of high levels of air pollution in St. Petersburg in 2017 are presented. The data of meteorological surface observations, temperature and wind sounding of the atmosphere, satellite images and the data of the automated system of monitoring of the atmospheric air of St. Petersburg for the synchronous time of observations are compared. The main sources and causes of increased levels of atmospheric pollution, which are recommended to be taken into account in the implementation of urban activities for the protection of atmospheric air.

Key words: unfavorable meteorological conditions, synoptic situations, air pollution, automated system of air monitoring.

Ilin M.Y., Kovalev V.S., Konyaev M.A. Comparative analysis of the results of measurement of wind profile obtained by method of aerological and distance sensing // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 135–140.

Provided the results of comparison of the wind profile estimates obtained by two methods: by mean wind values and by measurements of wind parameters at each altitude. Experiments has confirmed the correctness of both methods of comparison.

Key words: rawinsonde, wind profiler, meteorological lidar, pulsed Doppler lidar.

Related interannual oscillation of lightning activity in two regions in Northern Asia and circulation of low atmosphere in 2009-2016 / D.E. Innokentiev, V.I. Kozlov, N.K. Kononova, L.D. Tarabukina // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018 – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 141–145.

In Northern Asia there are two regions with high lightning activity showing oscillation behavior. The negative correlation of the lightning activity in these regions was observed. Such negative correlation was suggested to explain by the peculiarities of atmospheric circulation over Northern Asia.

Key words: lightning activity, lightning, Northern Asia, atmospheric circulation, atmospheric blocking, thunderstorm, lightning detector, WWLLN.

Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G. Sodar studies of spatiotemporal dynamics of the lower atmospheric layer // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018 – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 146–151.

Methodology of sodar sounding and results of investigations of spatiotemporal dynamics of the thermal structure, three wind velocity components, and turbulence characteristics in the atmospheric boundary layer are considered. An algorithm of sodar data processing has been developed that allows simultaneously the dynamics of the wind velocity vector to be visualized and the vertical profiles of the structural characteristics of temperature and wind velocity fields to be reconstructed. Results of investigations of statistical regularities and structures of both temperature and dynamic turbulence are presented, which is very important for practical applications.

Key words: atmospheric boundary layer, acoustic sounding of the atmosphere, spatiotemporal dynamics of wind velocity components, atmospheric turbulence.

Krasnov V.M., Kuleshov Y.V. Choice of the initial shape of an acoustic pulse from a point source // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 152–156.

Model calculations and the experiment have shown that for outlet angle of acoustic rays from a point source, at least, greater 23° it is preferable to use as the initial shape - modified Read's impulse, and at smaller angles - Read's impulse.

Key words: atmosphere, infrasound, model of propagation, shape of acoustic pulse.

Kruchenitskiy G.M., Statnikov K.A. The evolution of the vertical distribution of ozone and temperature over south pole // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 157–161.

Regression models of seasonality and long period evolution of ozone partial pressure and temperature are built. Long periodical tide influence on Antarctic ozone hole is discussing. It is shown that linear trends are not valid description of long term evolution of Antarctic atmosphere/

Key words: ozonosphere, statistical modeling, temperature vertical distribution, long periodical tide influence on atmosphere processes.

Influence of sudden stratospheric warming on vertical structure of middle atmosphere ozone in polar latitudes Arctic / Y.Y. Kulikov, A.V. Poberovsky, V.G. Ryskin, V.A. Yushkov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 162–166.

We present the results of studying the dynamics of ozone content in the middle atmosphere over Peterhof during stratospheric warming in the winter of 2016-2017 by the microwave radiometry. In the ground-based observations we used the mobile microwave ozonemeter (operated frequency 110.8 GHz). Estimations of vertical ozone distribution in an interval of altitudes 22-60 km are executed. These results were compared with satellite data on the total ozone content, altitude profiles of ozone and temperature in the middle atmosphere. Significant variations in ozone, which were caused by stratospheric warming of the minor type, were observed in the atmosphere over Peterhof at altitudes of 40 to 60 km.

Key words: middle atmosphere, sudden stratospheric warming, ozone.

Kurkin V.I., Naumenko A.A., Podlesnyi A.V. Ionosphere monitoring using multifunctional chirp-sounder of ISTP SB RAS // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 167–171.

The system of ionosphere and HF radio channels monitoring using a modern digital chirp-ionosonde is proposed. Brief description and characteristics of the Ionosonde-MS, combining the functions of vertical-incidence sounding of a continuous chirp-signal and reception of oblique-incidence sounding signals from the reference chirp-transmitters. The results of the Ionosonde-MS operation in continuous monitoring mode with a duty cycle of 1 and 5 minutes since 2012 are presented.

Key words: ionosphere, vertical-incidence sounding, oblique-incidence sounding, chirp-sounder, HF radio wave propagation.

Lopukha V.O., Fedoseeva N.V. Analysis of mesoscale polar lows cloudiness with multispectral satellite data // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky

MAA, 2018 – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 172–175.

This paper denotes clouds microphysics analysis with thematic processing of multispectral satellite images of polar lows, gather by satellite SUOMI NPP and Terra.

Key words: satellite meteorology, polar lows, SUOMI NPP, Terra.

Petrochenko V.M., Shuleikin V.N., Shchukin G.G. Application of atmospheric electric field in the tasks of applied geophysics // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 176–180.

The model of the relationships of hydrogen, methane, radon and atmospheric electric field is built. The results of contrasting variations of atmospheric electric field over geological variations with high concentration of hydrogen and methane in plumes are presented

Key words: hydrogen, methane, radon, atmospheric electric field.

Satellite data applications to address the hydrometeorological objectives / V.V. Asmus, N.I. Abrosimov, T.N. Burtseva, V.Y. Veryatin, G.M. Ioffe, V.A. Krovotyntsev, O.E. Milekhin, O.G. Novikova, I.S. Pustynskiy, V.I. Solovjov, I.A. Solovjova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 181–185.

The authors propose the satellite-based products package, which could be used for hydrometeorological safety of the armed forces of the Russian Federation and it's the most effective application in the current activity at various stages of the military operations, especially in the regions, poorly covered by the meteorological observations, as well as for planning the preparation and usage of armed forces in long-term period.

Key words: hydrometeorological conditions, satellite-based products, satellite monitoring, climate, meteorological phenomena.

Status and prospects of creating of geophysical observatory Mozhaisky MAA / I.A. Gotur, D.A. Denisenkov, V.Y. Zhukov, D.M. Karavaev, E.A. Korovin, Y.V. Kuleshov, C.V. Chernyshev, S.E. Chernyy, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 186–189.

There are reviewed the status and prospects of creating geophysical Observatory, as information and resource Center for testing of new technologies of hydrometeorological information and measuring systems, providing educational activities, ensure the scientific research in the field of applied hydrometeorology. Complex of equipments of the geophysical measurements and structure created the observatory Lehtusi in Leningrad region are presented.

Key words: geophysical observatory, hydrometeorological forecasts, ionosphere sounding, meteorological radar, atmospheric electricity, validation.

Possibilities of improving the system of industrial environmental control of water bodies located in the areas of responsibility of the Armed forces using remote sensing data / O.V. Grigorieva, D.V. Zhukov, A.V. Markov, V.F. Mochalov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 190–195.

The article assesses the effectiveness of the existing system of industrial environmental control of water bodies located in the areas of responsibility of the Armed forces and analyzes the possibility of its improvement through the introduction of modern methods and means of remote sensing. The article describes the scientific and methodological apparatus of thematic processing of hyperspectral aerospace survey data, created to identify the most common pollution of water areas (oil

products and mineral suspensions), as well as the results, confirming the reliability and efficiency of environmental assessment in water areas using hyperspectral data.

Key words: environmental monitoring, hyperspectral airspace imagery, remote sensing data processing, spectral characteristics.

Method of localization of the exhausts of damage substances in the region of large fires and wrecks in populations points with artificial fogs and clouds / A.P. Doronin, N.A. Kozlova, V.M. Petrochenko, N.B. Tolstobrova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 196–200.

In article the physical bases and technical realization of method of localization of the exhausts of damage substances in the region of large fires and wrecks in populations points with artificial fogs and clouds are considered.

Key words: contamination, chemical reagents, artificial fogs, artificial clouds.

Drozдов A.E., Zhilcov N.N., Sviridov V.P. Autonomous systems contact measurement of oceanographic parameters for solving problems of operational oceanography // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 201–205.

The current state and prospects of development of Autonomous complexes of contact measurements of Oceanographic parameters as an integral part of the system of operational Oceanology are considered. Proposals for the creation of a domestic subsystem of observations and measurements are shown.

Key words: hydrophysical parameters of contact measurement, operational Oceanography, we lose the probe.

Efremenko A.N., Moiseeva N.O., Chernyy V.V. Method of automated control of rainway floods for the interests of the hydrometeorological support of the troops // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 206–210.

The article deals with content of the methodology to automated control of rainway floods in the border and transfrontier regions of the Russian Federation. Automated monitoring of rainway floods was implemented in the mock-up of the automated program and technical complex (APTK) and was tested at the hydrological posts of the Ussuri River - the Amur tributary, where a catastrophic flood was caused in July- September 2013 by prolonged extreme rains. Simplified version of the methodology is used to control rainway floods in calculating the parameters of floods from small catchments and in the design of roads and access facilities.

Key words: rainway floods, control method, morphometric characteristics of the basin, automated program and technical complex.

A description of winter convection using by ATOVS data / D.A. Zhokhova, I.V. Kuzhevskaya, K.N. Pustovalov, V.V. Chursin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 211–214.

We considered event of winter convection along the occluded front. The results of using ATOVS temperature-humidity profiles and MODIS cloud products are presented.

Key words: satellite data, thunderstorm, Western Siberia.

Estimation of rainfall intensity with the meteorological radar / V.Y. Zhukov, M.S. Rykov, S.S. Suvorov, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. –

SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 215–218.

In the article were observed the methods of the rainfall intensity estimation through the meteorological radar. Was described an experimental technique for the study of the applicability of the new method, based on polarization measurements in domestic meteorological radar DMR-C. Was concluded the absence of qualitative differences in atmospheric condensation intensity maps, obtained with traditional and new method.

Key words: meteorological radar, measurement of atmospheric condensation intensity, polarization characteristics of the received signal.

The results of investigations of aerosol species in Arctic atmosphere using aircraft-laboratory Yak-42D «Roshydromet» in 2014-2015 / D.V. Kirin, N.O. Krutikov, A.N. Lykhanov, A.M. Strunin, M.A Strunin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 219–223.

The preliminary results of investigation of atmospheric aerosol distribution of different origin (small and sub-micron aerosol in a range of sizes from 0.03 to 3 μm , particles of black carbon) in Arctic regions (vicinity of Naryan-Mar, Yamal peninsula, north extremity of Novaya Zemlya archipelago) and in the Moscow region using the aircraft-laboratory Yak-42D "Roshydromet" are presented. Results of computer modeling of the air masses transfer, explaining the origin of anomalies in the concentrations of particles of aerosols are presented. It is shown that the concentrations of aerosols in an Arctic region strongly depend on meteorological conditions and structure of air flows of a weather scale. The concentrations of aerosols in the north extremity of Novaya Zemlya or in the vicinity of Naryan-Mar could change in wide limits, while in the Moscow area (in a neighborhood of Zhukovski town) the level of concentrations was invariably high. Concentrations of black carbon on levels higher than 3 kilometres were negligibly small. Comparative estimations of general amount of mass of aerosol particles in the Arctic regions and in the vicinity of megalopolis (Moscow) are presented.

Key words: atmosphere, wind, temperature, aerosols, aircraft investigations, Arctic.

Letuchiy Y.A. Ecological condition estimation at Military Forces objects of Russian Federation // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 224–229.

This article presents proposals for ecological condition estimation at army and navy objects. Contents and body of data of ecological condition estimation depends on negative level effect on environment (objective category). In general an estimation covers: 1) potential ecologically dangerous state of army objects; 2) contamination of environmental components; 3) influence of environmental contamination on human health; 4) state of natural ecological systems at the army areas.

Key words: ecological condition, army objects, environmental components, human health, natural ecological systems.

Ecological efficiency indicators of the armed forces of the Russian Federation / Y.A. Letuchiy, A.V. Novikov, A.S. Timoschuk, P.V. Shabalin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 230–234.

The authors propose to implement a process approach for efficient management system of ecological safety of the armed forces of the Russian Federation. Efficiency of the management system of ecological safety of the armed forces of the Russian Federation is being formed by three indicators: indicator of the effective management, indicator of the effective functioning and indicator of

the environmental conditions. Proposals based on the ecological management standards GOST R ISO 14001, 14004, 14031.

Key words: ecological safety control, efficient management system, a process approach, ecological management, indicators of the efficiency.

Udrish V.V. Technology training tailored climate information for meteorological support of the armed forces on the basis of program-technical complex for an Autograph-climate // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 235–240.

The possibilities of using the autograph-climate hardware-software complex, one of the main tasks of which is the preparation of specialized climate information for the automated system of hydrometeorological support of various levels of the military administration of the Armed Forces of the Russian Federation, are considered.

Key words: hydrometeorological support of planning and application of troops (forces) in theaters of military operations, specialized climatic information, space-time generalization (averaging) of hydrometeorological information.

Uspensky A.B. Development and application of national satellite systems for remote sensing of the atmosphere // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2018. – Release 662: Problems of military-applied Geophysics and control the state of the environment. – P. 241–245.

A brief description of the IKFS-2 infrared sounder and the MTVZA-GYa microwave sounder a polar-orbiting meteorological satellites of the “Meteor-M” series, as well as processing technologies of satellite measurements to obtain data of temperature-humidity sounding of atmosphere is presented. The results of the assimilation of the MTVZA-GYa data in numerical weather prediction models of Hydrometcenter of Russia are given.

Key words: IKFS-2 infrared sounder, MTVZA-GYa microwave radiometer, data assimilation, numerical weather prediction.

Абросимов Николай Игоревич, заведующий сектором отдела информационного обеспечения ФГБУ НИЦ «Планета» (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, 7); тел.: 8 (495) 605-27-87, e-mail: abrnick@rambler.ru

Аджиев Анатолий Хабасович, заведующий отделом стихийных явлений ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (8662) 40-19-16, e-mail: adessa1@yandex.ru

Андрианов Иван Николаевич, курсант 541-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); тел.: 8 (812) 347-95-51.

Антонов Степан Владимирович, ведущий инженер Автономной некоммерческой организации «Агентство атмосферных технологий» (123242, Россия, Москва, Дружинниковская ул., 15, офис 204); тел.: 8 (916) 865-11-84, e-mail: attech@mail.ru

Артюшина Анастасия Валерьевна, младший научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1), тел.: 8 (952) 885-60-54, e-mail: vav@iao.ru

Асмус Василий Валентинович, директор ФГБУ НИЦ «Планета», (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (499) 255-69-14, e-mail: asmus@planet.iitp.ru

Ашабоков Борис Азреталиевич, заведующий отделом физики облаков ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (8662) 40-48-41.

Бейтуганов Мусаби Ногманович, начальник отдела активных воздействий ФГБУ «Северо-Кавказская ВС Росгидромета» (360016, Россия, Нальчик, ул. Абидова, 15); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (928) 910-48-74, e-mail: bmn3112m@rambler.ru

Беккиев Керим Мухтарович, аспирант ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); тел.: 8 (8662) 40-24-84, e-mail: kerimbekk@mail.ru

Беккиев Мухтар Юсубович, директор ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (8662) 40-13-16, e-mail: mbekk@mail.ru

Бова Юлия Игоревна, старший преподаватель кафедры ИТ и ЕНД автономной некоммерческой организации высшего образования «Российский новый университет» (105005, Россия, Москва, ул. Радио, 22); тел.: 8 (495) 925-03-73 (доб. 244), e-mail: julia_bova@mail.ru

Болдырев Антон Сергеевич, и. о. директора Института радиотехнических систем и управления, заведующий кафедрой летательных аппаратов Южного федерального университета (347928, Россия, Ростовская обл., Таганрог, ул. Энгельса, 1, Г-116); тел.: 8 (988) 898-78-77, e-mail: boldyrev@sfedu.ru

Брюханов Илья Дмитриевич, аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); тел.: 8 (952) 882-41-94, e-mail: plyton@mail.tsu.ru

Бурцева Татьяна Николаевна, заведующая отделом информационного обеспечения ФГБУ НИЦ «Планета», (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); тел.: 8 (495) 605-27-87, e-mail: burc@planet.iitp.ru

Бычков Алексей Александрович, главный специалист автономной некоммерческой организации «Агентство атмосферных технологий» (123242, Россия, Москва, ул. Дружинниковская, 15, офис 204); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (916) 525-33-92, e-mail: bychkovaleks@gmail.com

Верятин Валерий Юрьевич, заместитель директора ФГБУ НИЦ «Планета». (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); тел.: 8 (499) 795-24-63, e-mail: veryatin@planet.iitp.ru

Веснин Артём Михайлович, ведущий инженер Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: artem_vesnin@iszf.irk.ru

Воейков Сергей Викторович, научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

Галилейский Виктор Петрович, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634021, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); кандидат физико-математических наук, тел: 8 (3822) 49-24-08, e-mail: gvp@iao.ru

Готюр Иван Алексеевич, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: gotur@newmail.ru

Григорьев Андрей Николаевич, доцент 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); доктор технических наук; тел.: 8(812) 347-95-51, e-mail: Grig-AN@ya.ru

Григорьев Валерий Федосеевич, помощник директора ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); e-mail: valgri@pgi.ru

Григорьева Ольга Викторовна, старший научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 978-85-18, e-mail: alenka12003@mail.ru

Данилкин Николай Петрович, заведующий лабораторией Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова, (129128, Россия, Москва, Ростокинская, 9); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (903) 708-60-93, e-mail: nickdaniikin8@yandex.ru

Дашкевич Жанна Владимировна, научный сотрудник ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (815) 225-39-58, e-mail: general@pgi.ru

Денисенков Дмитрий Анатольевич, преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (921) 989-00-55, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Дмитриков Георгий Геннадьевич, преподаватель 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: georgia81@inbox.ru

Доронин Александр Павлович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 297-75-95. e-mail: doronin52@mail.ru

Дробашевская Екатерина Александровна, инженер-исследователь Российского государственного гидрометеорологического университета (192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79); тел.: 8 (911) 824-26-53, e-mail: drobashevskaya@gmail.com

Дроздов Александр Ефимович, ведущий научный сотрудник АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (199106, Россия, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 309-2699, e-mail: mail@gningi.ru

Егоров Вячеслав Владимирович, начальник лаборатории ФГКУ «12 ЦНИИ МО РФ» (141307, Россия, Московская обл., Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2^б); кандидат технических наук; тел.: 8 (929) 585-63-10.

Елизаров Алексей Игоревич, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634021, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); кандидат технических наук; тел.: 8 (3822) 492408, e-mail: alex@iao.ru

Ефременко Александр Николаевич, начальник 32-го научного отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-74, e-mail: geofis_svu@mail.ru

Жбанков Геннадий Анатольевич, старший научный сотрудник, НИИ физики Южный федеральный университет (Россия, Ростов-на-Дону, ул.17-я линия, 15); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (904) 504-90-23, e-mail: gzhbankov@gmail.com

Желавский Сергей Александрович, заместитель начальника отдела ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России (141307, Россия, Московская обл., Сергиев Посад-7, Весенняя, 2Б); тел.: 8 (916) 182-22-10, e-mail: zhe7@rambler.ru

Жильцов Николай Николаевич, заместитель начальника управления гидрографии, геофизики и гидрометеорологии АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (199106, Россия, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41); тел.: 8 (911) 905-37-72, e-mail: 12345nik1@rambler.ru

Жохова Дарья Алексеевна, магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); тел.: 8 (923) 405-43-04, e-mail: darijazhohova@mail.ru

Жуков Владимир Юрьевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vuzhukov2002@list.ru

Жуков Денис Валерьевич, старший научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 292-45-39, e-mail: spb_pilligrim@rambler.ru

Журавлёв Сергей Владимирович, заведующий отделом Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова, (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); кандидат физико-математических наук; e-mail: szhuravlev-iag@yandex.ru

Журавлёва Татьяна Борисовна, ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (913) 116-60-39, e-mail: ztb@iao.ru

Зуев Сергей Викторович, научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (119334, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); кандидат технических наук; тел.: 8 (913) 880-45-44, e-mail: zuev@imces.ru

Зайцев Владимир Валентинович, старший научный сотрудник Центра космических услуг «КосмоИнформ-Центр» ГУАП (190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 570-64-32, e-mail: SIC@guar.ru

Иванов Владимир Евгеньевич, главный научный сотрудник ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (815) 225-39-58, e-mail: general@pgi.ru

Ильин Максим Юрьевич, ведущий инженер-конструктор, АО «Лазерные системы», (198515, Россия, Санкт-Петербург, пос. Стрельна, ул. Связи, 34, литер А); тел.: 8 (921) 645-14-06, e-mail: Ilyin_m@lsystems.ru

Иннокентьев Дмитрий Евгеньевич, ведущий инженер Института космофизических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера СО РАН (677980, Россия, Якутск, пр. Ленина, 31); тел.: 8 (4112) 390-484, e-mail: sku089@gmail.com

Иоффе Геннадий Маркович, заведующий отделом оперативной обработки спутниковой метеорологической информации ФГБУ НИЦ «Планета». (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); тел.: 8 (499) 795-23-47, e-mail: offe@planet.iitp.ru

Караваяев Дмитрий Михайлович, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: dm.karavaev@mail.ru

Кешева Лара Асировна, старший научный сотрудник ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); кандидат физико-математических наук; e-mail: kesheva.lara@yandex.ru

Кири́н Дми́трий Валенти́нович, младший научный сотрудник ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3); тел.: 8 (495) 408-66-77, e-mail: holod321@mail.ru

Кисе́лёв Алексе́й Влади́мирович, младший научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: kiselev@iszf.irk.ru

Клово Алекса́ндр Гео́ргиевич, доцент кафедры высшей математики Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (347900, ГСП 17А, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (928) 122-10-64, e-mail: klovo_ag@mail.ru

Коберник Дми́трий Алекса́ндрович, начальник лаборатории ФГКУ 12 ЦНИИ МО РФ (141307, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2^б); тел.: 8 (985) 259-29-77.

Ковале́в Вале́рий Серге́евич, ведущий инженер-программист АО «Лазерные системы», (198515, Россия, Санкт-Петербург, пос. Стрельна, ул. Связи, 34, лит. А); тел.: 8 (921) 645-14-06, e-mail: Ilyin_m@lsystems.ru

Козелов Бори́с Влади́мирович, директор ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (921) 272-98-72, e-mail: boris.kozelov@gmail.com

Козлов Влади́мир Ильи́ч, ведущий научный сотрудник Института космофизических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера СО РАН (677980, Россия, Якутск, пр. Ленина, 31); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (4112) 390-479, e-mail: vkozlov@ikfia.usn.ru

Козлова Ната́лья Алекса́ндровна, научный сотрудник 32-го отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 1); тел.: 8 (911) 998-40-45, e-mail: cozlova.nat.2012@yandex.ru

Кокаре́в Дми́трий Вале́риеви́ч, ведущий инженер Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634021, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); тел.: 8 (3822) 49-24-08, e-mail: kdvdv_02@iao.ru

Коно́нов Иго́рь Ива́нович, доцент кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета (198504, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (812) 428-43-07, e-mail: igor_kononov@mail.ru

Коно́нова Ни́на Константи́новна, ведущий инженер Института географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., 29); кандидат географических наук; тел.: 8 (499) 129-04-74, e-mail: ninakononova@yandex.ru

Коняе́в Макси́м Анато́льевич, доцент кафедры лазерной техники БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова (190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1 Красноармейская, 1); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 612-02-88.

Коровин Евгений Александрович, старший преподаватель 116-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: evgen_korovin@mail.ru

Костромитинов Алексей Валерьевич, инженер 511-й лаборатории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 346-96-52.

Котович Галина Васильевна, ведущий инженер-программист Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: kotovich@iszf.irk.ru

Котонаева Надежда Геннадьевна, заместитель заведующего отделом Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, Ростокинская ул., 9); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (499) 181-36-22, e-mail: kongt@yandex.ru

Красненко Николай Петрович, главный научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (634055, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); профессор кафедры радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 40); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 492-418, e-mail: krasnenko@imces.ru

Краснов Валерий Михайлович, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vmkrasnov@yandex.ru

Кровотынцев Владимир Анатольевич, заведующий отделом обработки спутниковых данных ФГБУ НИЦ «Планета». (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 252-05-35, e-mail: vladimir.krv@gmail.com

Крутиков Николай Олегович, руководитель группы ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3); тел.: 8 (495) 408-66-77, e-mail: kroutikov@mail.ru

Крученицкий Григорий Михайлович, заведующий отделом Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (495) 408-77-41, e-mail: omd@cao-rhms

Крюковский Андрей Сергеевич, декан факультета информационных систем и компьютерных технологий автономной некоммерческой организации высшего образования «Российский новый университет» (105005, Россия, Москва, ул. Радио, 22); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (495) 925-03-73, e-mail: isikt_rosnou@mail.ru

Кудро Дмитрий Викторович, начальник 35-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: (911)933-48-52, e-mail: kudro@list.ru

Кужевская Ирина Валерьевна, доцент Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); кандидат географических наук; тел.: 8 (923) 403-72-29, e-mail: ivk@ggf.tsu.ru

Кузьмин Владимир Аркадиевич, аспирант ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); тел.: 8 (8662) 40-19-16, e-mail: adessa1@yandex.ru

Кулешов Юрий Владимирович, заместитель начальника по научной и учебной части Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: y_kuleshov@mail.ru

Куликов Юрий Юрьевич, ведущий научный сотрудник Института прикладной физики РАН (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (951) 909-43-46, e-mail: yuyukul@appl.sci-nnov.ru

Куповых Геннадий Владимирович, заведующий кафедрой высшей математики Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (347900, ГСП 17А, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (928) 954-36-42, e-mail: kupovykh@sfsedu.ru

Куркин Владимир Иванович, заведующий отделом физики околоземного космического пространства Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (3952) 564504, e-mail: kurkin@iszf.irk.ru

Лапшин Владимир Борисович, главный научный сотрудник Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова, (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (985) 222-02-67.

Лебедев Николай Вячеславович, научный сотрудник ФГКУ 12 ЦНИИ МО РФ (141307, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, д. 2^б); кандидат технических наук; тел.: 8 (916) 569-69-87, e-mail: leb_nick@mail.ru

Летучий Юрий Александрович, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka.52@mail.ru

Лопуха Владимир Олегович, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); тел.: 8 (981) 104-61-48, e-mail: volopukha@yandex.ru

Лукин Дмитрий Сергеевич, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт - Государственный университет (141701, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9); доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.: 8 (495) 408-57-00, e-mail: mipt.ru

Лукьянов Александр Николаевич, старший научный сотрудник ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 408-61-50, e-mail: lukyanov@saomsk.mipt.ru

Марков Андрей Викторович, старший научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 995-10-33, e-mail: markov_av69@mail.ru

Матвиенко Геннадий Григорьевич, главный научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634021, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 49-24-08, e-mail: matvienko@iao.ru

Машуков Хазратали Хамидович, заведующий лабораторией радиотелеметрии ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (928) 693-99-15, e-mail: hazret53@rambler.ru

Милехин Олег Евгеньевич, заместитель директора по науке ФГБУ НИЦ «Планета», (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 255-97-49, e-mail: milekhin@planet.iitp.ru

Моисеева Наталья Олеговна, доцент кафедры авиационной метеорологии и экологии Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 704-15-80, e-mail: natali.ziadinova@yandex.ru

Морозов Александр Михайлович, ведущий программист Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634021, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); тел.: 8 (3822) 492-408, e-mail: moroz@iao.ru

Мочалов Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 916-12-09, e-mail: vicavia@yandex.ru

Мыльникова Анна Александровна, младший научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: manna@iszf.irk.ru

Назаров Сергей Алексеевич, младший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ МО РФ» (141307, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2^б); тел.: 8 (999) 095-40-51, e-mail: nazartos@gmail.com

Насртдинов Ильмир Мансурович, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (913) 868-70-01, e-mail: wizard@iao.ru

Науменко Андрей Александрович, инженер-исследователь Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-59, e-mail: naum@mail.iszf.irk.ru

Никольский Василий Александрович, начальник отдела ФГКУ 12 ЦНИИ МО РФ (141307, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, д. 2^б); кандидат технических наук; тел.: 8 (926) 148-53-35.

Новиков Александр Валерьевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 760-25-49, e-mail: salska@mail.ru

Новикова Оксана Геннадьевна, заведующая отделом обработки спутниковой информации Сибирского центра ФГБУ НИЦ «Планета» (Россия, Новосибирск, ул. Советская, 30); тел.: 8 (383) 363-46-05, e-mail: avn@rscpod.siberia.net

Ойнац Алексей Владимирович, старший научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: oinats@iszf.irk.ru

Петроченко Вячеслав Михайлович, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 257-03-40, e-mail: vmpetrochenko@mail.ru

Пивкин Александр Николаевич, старший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, Россия, Пермь, ул. Чистопольская, 16); кандидат технических наук; тел.: 8 (919) 469-30-10, e-mail: pivkin1@mail.ru

Поберовский Анатолий Васильевич, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института физики СПбГУ (198504, Россия, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (904) 513-71-79, e-mail: avpob@troll.phys.spbu.ru

Погорельцев Александр Иванович, профессор Российского государственного гидрометеорологического университета (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79); доктор физико-математических наук, профессор; e-mail: apogor@rshu.ru

Подлесный Алексей Витальевич, научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 56-45-59, e-mail: pav@mail.iszf.irk.ru

Пустовалов Константин Николаевич, младший научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (634055, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); тел.: 8(923)431-96-53, e-mail: const.pv@yandex.ru

Пустынский Илья Сергеевич, заведующий отделом разработки и внедрения НИОКР Дальневосточного центра ФГБУ НИЦ «Планета» (Россия, Хабаровск, ул. Ленина, 18); тел.: 8 (4212) 23-38-40, e-mail: pis@dvrscpod.ru

Репин Андрей Юрьевич, директор Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (499) 187-81-86, e-mail: director@ipg.geospace.ru

Романов Илья Владимирович, старший научный сотрудник Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 181-36-22, e-mail: drsuvar@gmail.com

Ростокин Илья Николаевич, доцент кафедры УКТС Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (920) 944-15-84, e-mail: arostokina@yandex.ru

Ростокина Елена Анатольевна, доцент кафедры УКТС Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (920) 944-15-84, e-mail: arostokina@yandex.ru

Руденко Виталий Владимирович, ведущий научный сотрудник ФГКУ 12 ЦНИИ МО РФ (141307, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2^б); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (915) 085-91-95, e-mail: jasmin@spnet.ru

Рудь Мария Юрьевна, научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 970-37-37, e-mail: smeyashka@gmail.com

Рыков Максим Сергеевич, инженер-программист АО «ВНИИРА» (188196, Россия, Санкт-Петербург, Шкиперский проток, 19).

Рыскин Виталий Геннадьевич, старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (920) 019-44-43, e-mail: rys@appl.sci-nnov.ru

Саидов Алишер Голибович, научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 672-83-66, e-mail: mysnow@mail.ru

Самохвалов Игнатий Викторович, заведующий кафедрой Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (382) 241-39-84, e-mail: lidar@mail.tsu.ru

Свидельский Сергей Сергеевич, аспирант кафедры высшей математики Института компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет (347900, ГСП 17А, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44); тел.: 8 (928) 141-03-41, e-mail: dr.leavesea@yahoo.com

Свиридов Валерий Петрович, начальник отдела гидрометеорологии АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (199106, Россия, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41); тел.: 8 (911) 086-30-20, e-mail: Sviridov050759@ya.ru

Сергеев Борис Николаевич, главный специалист автономной некоммерческой организации «Агентство атмосферных технологий» (123242, Москва, ул. Дружинниковская, 15, офис 204); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (916) 423-91-62, e-mail: bsergeev@rambler.ru

Сидоренко Антон Евгеньевич, научный сотрудник ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); кандидат физико-математических наук; e-mail: anton@pgi.ru

Смышляев Сергей Павлович, профессор Российского государственного гидрометеорологического университета (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79); доктор физико-математических наук, профессор; e-mail: smyshl@rshu.ru

Соловьёв Валерий Иванович, заведующий отделом спутниковой метеорологии ФГБУ НИЦ «Планета», (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 255-05-14, e-mail: solovjev@planet.iitp.ru

Соловьёва Ирина Алексеевна, заместитель директора Сибирского центра ФГБУ НИЦ «Планета» (Россия, Новосибирск, ул. Советская, 30); тел.: 8 (383) 363-46-05, e-mail: avn@rscpod.siberia.net

Статников Константин Андреевич, аспирант Московского физико-технического института – государственного университета (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 5); тел.: 8 (996) 973-38-93, e-mail: s_kozlov@inbox.ru

Струнин Александр Михайлович, младший научный сотрудник ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 408-66-77, e-mail: strunin13@gmail.com

Струнин Михаил Александрович, заведующий лабораторией ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (495) 408-66-77, e-mail: mi-khail_strunin@mail.ru

Суворов Станислав Станиславович, почетный профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Тарабукина Лена Дмитриевна, младший научный сотрудник Института космофизических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера СО РАН (677980, Россия, Якутск, пр. Ленина, 31); тел.: 8 (4112) 390-484, e-mail: tarabukina@ikfia.ysn.ru

Ташилова Алла Амарбиевна, старший научный сотрудник ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); кандидат физико-математических наук; e-mail: tashilovaa@mail.ru

Терещенко Евгений Дмитриевич, научный руководитель ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); доктор физико-математических наук; e-mail: evgteres@pgi.ru

Терещенко Павел Евгеньевич, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала ФГБНУ «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова» (199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 5, лит. «Б», а/я 10); научный сотрудник ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); кандидат физико-математических наук; e-mail: tereshchenko@gmail.com

Тимошенко Дмитрий Владимирович, доцент кафедры высшей математики Института компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет (347900, ГСП 17А, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (909) 4036781, e-mail: dmitrytim@sfnu.ru

Тимошук Александр Сергеевич, старший преподаватель 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (981) 848-32-95, e-mail: astim2@yandex.ru

Тлеужева Марьяна Хасанбиевна, аспирант ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); тел.: 8 (960) 424-09-24, e-mail: maryana.tleuzheva.90@mail.ru

Толстоброва Наталия Борисовна, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 383-55-91, e-mail: tolstobrova.nb@gmail.com

Удриш Владимир Викторович, начальник Гидрометеорологической службы ВС РФ, (119160, Россия, Москва, Фрунзенская наб., 22/2); тел.: 8 (495) 696-47-53.

Успенский Александр Борисович, главный научный сотрудник ФГБУ НИЦ «Планета» (123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (926) 246-23-17, e-mail: uspensky@planet.iitp.ru asmus@planet.iitp.ru

Федосеева Елена Валерьевна, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (905) 144-42-06, e-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Федосеева Наталья Владимировна, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); кандидат географических наук; тел.: 8 (921) 771-20-33, e-mail: fednat@mail.ru

Филиппов Михаил Юрьевич, старший научный сотрудник Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 181-3622, e-mail: mm.grif@gmail.com

Хотенко Елена Николаевна, ученый секретарь Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 181-4554, e-mail: madam.ermolova@gmail.com

Частухин Андрей Викторович, главный специалист автономной некоммерческой организации «Агентство атмосферных технологий» (123242, Россия, Москва, ул. Дружинниковская, 15, офис 204); тел.: 8 (916) 257-69-61, e-mail: a.v.chastuhin@mail.com

Чёрный Виктор Васильевич, старший научный сотрудник 32-го научного отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-74, e-mail: vchernyy1956@gmail.com

Чёрный Сергей Эдуардович, заместитель начальника Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: serg_chernyy@mail.ru

Чернышев Сергей Викторович, преподаватель 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 989-00-55, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Чистякова Лидия Васильевна, инженер-программист Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); тел.: 8 (3952) 564554, e-mail: chist@iszf.irk.ru

Чичкова Елена Фёдоровна, заместитель директора Центра космических услуг «КосмоИнформ-Центр» ГУАП (190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); кандидат географических наук; тел.: 8 (812) 570-64-32, e-mail: SIC@guar.ru

Чурсин Владислав Вячеславович, магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); тел.: 8 (952) 898-85-39, e-mail: skriptym@mail.ru

Шабалин Павел Вадимович, адъюнкт 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-52, 8 (911) 816-43-93, e-mail: vka.52@mail.ru

Шаманаева Людмила Григорьевна, старший научный сотрудник лаборатории распространения оптических сигналов Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, (634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); доцент кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 491-636, e-mail: sima@iao.ru

Шаповалов Александр Васильевич, заведующий лабораторией ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (918) 785-53-50, e-mail: atajuk@mail.ru

Шокуев Рафаэль Артурович, студент 6-го курса кафедры СУМГФ ФАКИ Московского физико-технического института – государственного университета (141701, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9); тел.: 8 (495) 408-53-44, e-mail: ra-fa.shok@mail.ru

Шувалов Вячеслав Александрович, начальник лаборатории Центрального научно-исследовательского института машиностроения (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, 4); кандидат технических наук; тел.: 8 (903) 588-81-23, e-mail: VAShuvalov@tsniimash.ru

Шулейкин Владимир Николаевич, главный научный сотрудник Института проблем нефти и газа (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 65); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (903) 511-91-36, e-mail: shvn@yandex.ru

Щукин Георгий Георгиевич, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Юшков Владимир Александрович, ведущий научный сотрудник Центральной аэрологической обсерватории (141700, Россия, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 760-05-37, e-mail: vladimir@saomsk.mipt.ru

Ясюкевич Юрий Владимирович, старший научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291); доцент Иркутского государственного университета (664003, Россия, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (3952) 56-45-54, e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

Алëхин Сергей Григорьевич, докторант 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mail.ru

Григорьев Андрей Николаевич, доцент 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-51.

Доронин Александр Павлович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: doronin52@mail.ru

Жуков Владимир Юрьевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 989-00-55, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Караваяев Дмитрий Михайлович, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 989-00-55, e-mail: dm.karavaev@mail.ru

Коровин Евгений Александрович, старший преподаватель 116-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 989-00-55, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Корыстин Александр Александрович, докторант 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 346-96-52.

Краснов Валерий Михайлович, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vmkrasnov@yandex.ru

Лебедев Андрей Борисович, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 346-96-52.

Летучий Юрий Александрович, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka.52@mail.ru

Маков Алексей Борисович, докторант 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 923-08-03, e-mail: alexmakof@mail.ru

Ставров Константин Геннадьевич, старший научный сотрудник научно-образовательного центра Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka.52@mail.ru

Щукин Георгий Георгиевич, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.:8 (911) 756-37-21, e-mail: ggshchukin@mail.ru