

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

Выпуск 674
Проблемы
военно-прикладной
геофизики и контроля
состояния природной
среды
2020 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 Российской Федерации;

А.М. Гончаров – начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности
и технологического сопровождения передовых технологий
(инновационных исследований) МО РФ *доктор воен. наук, проф.*;

М.А. Еремеев – профессор кафедры института комплексной безопасности и специального приборостроения
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» *доктор техн. наук, проф.*;

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

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

Б.В. Соколов – главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации;*

К.Г. Ставров – главный научный сотрудник научно-исследовательского океанографического центра
Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института
доктор техн. наук, проф.

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. Ю.В. Кулешов

Составители:

Г.Г. Щукин, доктор физико-матем. наук, проф.;

И.А. Готюр, доктор техн. наук, доц.

Редколлегия:

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

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

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

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

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

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

И.А. Готюр, *доктор техн. наук, доц.*; **А.П. Доронин**, *доктор техн. наук, проф.*;

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

В.Н. Калинин, *доктор техн. наук, проф.*; **Б.Д. Казахов**, *доктор воен. наук, проф.*;

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

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

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

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

Г.Н. Мальцев, *доктор техн. наук, проф.*; **Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук;*

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

Н.А. Репях, *кандидат филос. наук, доц.*; **А.М. Сычева**, *доктор техн. наук, проф.*;

И.В. Фоминов, *доктор техн. наук;* **А.В. Харченко**, *доктор техн. наук, доц.*;

К.Ю. Цветков, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Чарушников**, *доктор воен. наук, проф.*

Издание зарегистрировано
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.

Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).
Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

***Издание подготовлено по материалам VI Всероссийской научной
конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля
состояния природной среды» при финансовой поддержке Российского
фонда фундаментальных исследований, проект № 20-05-20016\20***

Ответственный за выпуск:

начальник РИО **С.В. Чернышев**

Выпускающий редактор: *А.В. Головина*

Технический редактор

и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*

Техническая поддержка:

В.В. Семёнов

Адрес:

197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;

тел.: 8 (812) 347-97-69;

<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 14.07.2020.

Формат печатного листа 445×300/4.

Уч.-печ. л. 78,00. Уч.-изд. л. 38,75

Тираж 120 экз. Заказ 0000.

Отпечатано в типографии «Пальмира»

197374, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 89, лит. А, пом. 9.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Алёхин С.Г., Мещеряков С.Е., Шемелов В.А.</i> Модели представления метеорологической информации в интеллектуальной системе автоматического управления беспилотных летательных аппаратов	8
--	---

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ

<i>Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С.</i> Математическое моделирование влияния ионосферы Земли на структуру радиоволн в окрестности каустики	18
<i>Ганжса А.А.</i> Инициирование триггерных молний с помощью квантово-структурных нитей	23
<i>Гарбацевич В.А., Едемский Д.Е., Попов А.В., Прокопович И.В.</i> Опыт георадарного зондирования с воздушного носителя	28
<i>Егошин И.А., Зыков Е.Ю., Колчев А.А., Чернов А.Г., Шумаев В.В.</i> Эффект невзаимности при квазивертикальном зондировании ионосферы	34
<i>Калинкевич А.А., Кутуза Б.Г., Манаков В.Ю., Масюк В.М., Плющев В.А.</i> О компенсации влияния ионосферы Земли на качество синтезированных радиолокационных изображений	39
<i>Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В.</i> Моделирование параметров низкочастотного электромагнитного излучения в волноводе Земля – ионосфера, генерируемого литосферными токами	44
<i>Колесников Р.В., Сивоконь В.П.</i> Динамические характеристики магнитоориентированных неоднородностей в условиях модификации ионосферы	49
<i>Коломин М.В., Котонаева Н.Г., Михайлов В.В.</i> Эффективность коррекции ионосферных моделей по оперативной информации одной станции вертикального радиозондирования ионосферной наблюдательной сети	55
<i>Савочкин П.В.</i> Модель формирования амплитудно-фазового распределения на апертуре приемной антенной решетки с учетом возмущений трассы распространения в радиолокационных станциях коротковолнового диапазона	61

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А., Торопова М.Л.* Развитие электризации конвективного облака по данным эмпирической и численной моделей..... 68
- Аджиев А.Х., Керефова З.М., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Черкесов А.А.* Анализ данных многолетних атмосферно-электрических наблюдений на территории Северо-Кавказского региона..... 75
- Алёхин С.Г., Иванов Р.Д.* Определение границ климатических сезонов года на основе метода разложения полей среднесуточной температуры воздуха по естественным ортогональным функциям..... 80
- Артюшина А.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М.* Влияние 3D эффектов облаков на интенсивность солнечного излучения в схеме лимбового зондирования Земли: результаты численных экспериментов 87
- Ахмедшин Р.Л., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г., Минлигареев В.Т., Репин А.Ю., Тасенко С.В., Удриш В.В.* Информационное обеспечение Гидрометеорологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации Федеральным центром мониторинга геофизической обстановки..... 92
- Ашабоков Б.А., Кешева Л.А., Крученицкий Г.М., Ташилова А.А., Шокуев Р.А.* Использование данных о периодической изменчивости снежного покрова для валидации сведений о чувствительности спутниковой аппаратуры оптического диапазона..... 100
- Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С.* Эффект магнитного зенита при модификации высокоширотной верхней ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации..... 104
- Борисов А.А., Кулешов Ю.В., Маков А.Б.* Метод диагностики поля приземного давления в неосвещенном в метеорологическом отношении физико-географическом районе 109
- Борисов А.А., Маков А.Б., Суворов С.С.* Модель показателя эффективности гидрометеорологического обеспечения при решении задач прогнозирования гидрометеорологических условий 117
- Брюханов И.Д., Локтюшин О.Ю., Самохвалов И.В.* Оценка повторяемости образования зеркальных конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лазерного зондирования..... 123
- Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваев Д.М., Щукин Г.Г.* СВЧ радиометрические измерения содержания парообразной и жидкокапельной влаги в тропосфере..... 128

<i>Бычков А.А., Корнеев В.П., Платонов Н.А., Частухин А.В.</i> Состояние и перспективы развития работ по защите от заморозков.....	133
<i>Волкова Е.В., Кухарский А.В., Музылев Е.Л., Старцева З.П.</i> Определение сумм осадков по спутниковым данным для части Европейской территории России.....	139
<i>Готюр И.А., Мешков А.Н., Рудь М.Ю., Яременко И.А.</i> Метод поиска очагов кучево-дождевой облачности по данным космических аппаратов гидрометеорологического назначения с применением технологий искусственных нейронных сетей...	146
<i>Готюр И.А., Мешков А.Н., Рудь М.Ю., Яременко И.А.</i> Перспективы применения технологий машинного обучения для обработки гидрометеорологической информации	152
<i>Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.</i> Обнаружение вертикальных потоков воздуха радиолокационными методами.....	160
<i>Диденко К.А., Погорельцев А.И.</i> Исследование взаимодействий стационарных планетарных волн с использованием модельных данных модели средней и верхней атмосферы	166
<i>Ефременко А.Н., Моисеева Н.О., Потемкин В.С., Черный В.В.</i> Метод прогнозирования подъема уровня воды.....	171
<i>Зайнетдинов Б.Г., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В.</i> Формирование суточных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли в различных метеорологических условиях	176
<i>Золотухина О.И.</i> Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома «Восточный».....	181
<i>Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В., Филатов Д.Е.</i> Динамика спектра атмосферно-электрических и метеорологических величин приземного слоя во время выпадения ливневых осадков.....	188
<i>Каплин В.Г., Корнилов Т.В., Кочин Д.А., Федченко В.Г., Чичкова Е.Ф.</i> Эшелонированный мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в лесостепи Самарской области.....	195
<i>Клещёва Т.И., Пермяков М.С., Поталова Е.Ю.</i> Мониторинг тайфунов по данным глобальной сети локализации молний	200
<i>Копытенко Ю.А., Латышева О.В., Петрова А.А.</i> Влияние разломных зон земной коры на эволюцию толщины и кромки ледяного покрова Арктики.....	207

<i>Корнеев О.Ю.</i> Синоптико-статистический диагноз приземного барического поля над акваторией Северного Ледовитого океана в условиях ограниченности исходной гидрометеорологической информации	212
<i>Корыстин А.А., Кулешов Ю.В.</i> Подход к анализу наблюдаемости ионосферы над труднодоступными территориями для космических систем и комплексов мониторинга.....	217
<i>Кулешов В.П., Митник Л.М., Митник М.Л.</i> Глобальные поля яркостной температуры Земли в диапазоне 10–190 ГГц по измерениям со спутников Метеор-М № 2 и № 2-2.....	223
<i>Лобанов К.А.</i> Диагностика состояния ионосферы для задач геофизического обеспечения функционирования технических систем контроля объектов космического пространства	229
<i>Лукьянова Р.Ю.</i> Численная модель распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы	234
<i>Панчук А.В.</i> Программа спектроскопических измерений влагосодержания в дневной и ночной атмосфере Земли.....	239
<i>Петроченко В.М., Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г.</i> Учет шумовых влияний относительной влажности и атмосферного давления при решении задач атмосферно-электрического мониторинга геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов.....	245
<i>Ростокин И.Н., Ростоккина Е.А., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.</i> Калибровка СВЧ радиометрической системы по радиотепловому излучению атмосферы.....	250
<i>Семёнов В.В.</i> Модель прозрачности атмосферы для оптико-электронных систем «смотрящего» типа в спектральном диапазоне 8–12 мкм	256
<i>Яременко И.А.</i> Метод распределенной обработки метеорологической информации на основе технологий искусственных нейронных сетей	263
РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ	
<i>Готюр И.А., Коровин Е.А., Овчинников Ю.Д., Юсупов И.Е.</i> Принципы построения антенных систем грозопеленгаторов-дальномеров	271
<i>Григорьев А.Н., Зайцев В.В., Комраков Д.Н., Масеев Н.В., Рябчевский В.Ю.</i> Методика выбора оптимальной компоновки оптико-электронного бортового комплекса в задаче воздушного мониторинга площадного объекта.....	276

Рефераты статей	287
Сведения об авторах	300
Сведения о рецензентах	312

С.Г. Алёхин*,

кандидат технических наук, доцент;

С.Е. Мещеряков*;

В.А. Шемелов*,

кандидат технических наук, доцент

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

МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены вопросы сбора и обработки метеорологической информации на борту беспилотных летательных аппаратов для коррекции полетных заданий с применением технологий искусственного интеллекта.

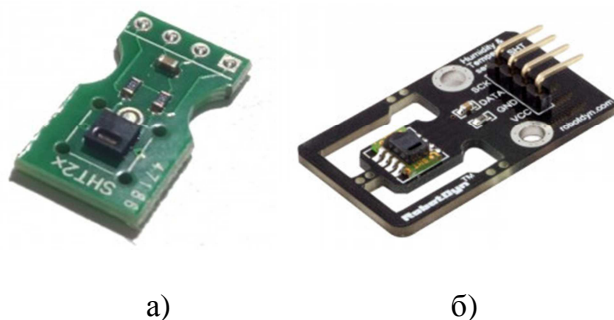
Ключевые слова: метеорологические условия, интеллектуальная система, искусственный интеллект, модели представления информации.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире область применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) весьма обширна и включает в себя мониторинг окружающей среды, контроль дорожного движения, спасательные операции, патрулирование границ, оборонные программы и мн. др. Эта область постоянно расширяется в соответствии с успехами в развитии технологий, которые обеспечивают создание новых БЛА с искусственным интеллектом.

БЛА могут оснащаться ультразвуковыми сенсорами, радарными датчиками, лазерными локаторами, видеокамерами, а также различными микроконтроллерами, бортовыми вычислительными машинами с программным обеспечением и т.п. Цель такого оснащения – расширение функциональных возможностей БЛА за счет повышения устойчивости и точности процессов управления. Но при этом БЛА остается авиационным комплексом, который в той или иной мере подвержен влиянию метеорологических условий, которые могут в значительной степени влиять на его функциональные возможности.

Допустим, что система автоматического управления БЛА адаптивна и способна за счет соответствующих датчиков определять метеорологические условия, в которых проходит полет БЛА, и при неблагоприятных условиях – менять программу полета. Сегодня такие возможности существуют. В связи с последними достижениями радиоэлектроники датчики атмосферного давления, температуры и влажности воздуха стали миниатюрными и недорогими (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1. Датчики температуры и влажности:
а – SHT20; б – SHT1x

Сегодня технологии искусственного интеллекта позволяют спроектировать систему сбора и обработки метеорологической информации на борту БЛА как часть интеллектуальной системы (ИС) автоматического управления, изменяющей параметры движения БЛА в зависимости от степени воздействия на них атмосферы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В настоящее время тематика искусственного интеллекта (ИИ) охватывает огромный перечень научных направлений, начиная с таких задач общего характера, как обучение и восприятие, и заканчивая такими специальными задачами, как игра в шахматы, доказательство математических теорем, сочинение поэтических произведений и диагностика заболеваний. В искусственном интеллекте систематизируются и автоматизируются интеллектуальные задачи, и поэтому эта область касается любой сферы интеллектуальной деятельности человека. Можно сказать, что искусственный интеллект является универсальной научной областью. По этой причине однозначного общего определения ИИ не существует. Одни формулировки определений касаются мыслительных процессов и способов рассуждения, а другие – обучения и поведения [1, 2].

Предметом исследования вопроса сбора и обработки метеорологической информации на борту БЛА являются технологии искусственного интеллекта, т.е. научно-технические методы решения подобных задач. В этом контексте целесообразно использовать следующее определение. «Искусственный интеллект – это автономная система, решающая задачу самостоятельной ориентации и принятия решений, ведущих к достижению цели, в сложной, непредсказуемой обстановке во взаимодействии с другими системами ИИ. При этом сама цель и критерии ее достижения могут быть определены нечетко, неоднозначно, допускать многовариантность интерпретации и смену приоритетов в процессе функционирования» [3].

Как следует из принятого определения, основной критерий «интеллектуальности» технических систем состоит в их способности к выработке решений на основе воспринимаемой информации. Соответственно, задачи восприятия (сбора) информации из окружающей среды и выработка решения (обработка информации) составляют техническую и научную суть проблемы разработки технологии ИИ. То есть технология сбора метеорологической информации на борту БЛА должна быть основана на применении технических средств измерений параметров атмосферы, функционирующих на высотах и скоростях полета БЛА. Технология обработки метеорологической информации на борту БЛА должна быть основана на математической обработке результатов измерений параметров атмосферы с помощью бортовых вычислительных машин, передачи результатов обработки в систему управления БЛА для выработки решения о коррекции маршрута полета.

Для примера предложим структуру интеллектуальной системы автоматического управления БЛА с включением в ее состав датчиков измерения параметров атмосферы (рис. 2).

В состав ИС БЛА должны входить следующие основные элементы, отвечающие за реализацию автоматической коррекции маршрута полета в зависимости от окружающих метеорологических условий:

- оптическая система коррекции траектории полета и посадки;
- датчики измерения параметров атмосферы, устанавливаемые в корпусе БЛА;
- бортовая цифровая вычислительная система, обеспечивающая обработку метеорологических данных, поступающих от датчиков и преобразователей, и формирующая набор входных параметров для ИС поведения и целеуказания;
- ИС управления полетом, обеспечивающая пилотирование БЛА в процессе коррекции траектории полета на основе априорно заложенных моделей целесообразного поведения БЛА в зависимости от окружающих метеорологических условий;

– ИС управления исполнительными устройствами, обеспечивающая контроль за состоянием крыльев, рулей, маршевого двигателя и управление ими в зависимости от заданного маневра (снижение, набор высоты, ускорение, крены влево/вправо и т.п.).



Рис. 2. Структура интеллектуальной системы автоматического управления БЛА с датчиками измерения параметров атмосферы (пример)

Обеспечение функционирования перечисленных элементов интеллектуальной системы автоматического управления БЛА и обоснование уровня ее автономности при сборе и обработке метеорологической информации на борту возможно на основе разработки, в первую очередь, технологии представления знаний [1, 4, 5, 6].

В рамках указанного направления решаются задачи, связанные с формализацией и представлением знаний в памяти ИС. Для этого разрабатываются модели представления знаний и языки для описания знаний, выделяются различные типы знаний, изучаются источники, откуда ИС может получать знания, создаются процедуры и методы получения знаний для ИС. ИС – это система, функционирование которой основано на знаниях о проблемной области, которые хранятся в ее памяти.

МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Информация, которой оперируют ЭВМ, разделяется на процедурную и декларативную. Процедурная информация овеществлена в программах, которые выполняются ЭВМ при решении задач, декларативная информация – в данных, с которыми эти программы работают [6]. Если информация накапливается и хранится в памяти ЭВМ, то она образует информационную базу.

По мере развития исследований в области ИС возникла концепция «знаний», которая объединила в себе черты процедурной и декларативной информации. Знаниям, как форме представления информации в ЭВМ, присущ ряд свойств: внутренняя интерпретируемость, структурированность, связность, семантическая метрика и активность. Перечисленные пять свойств знаний определяют ту грань, за которой данные превращаются в знания, а базы данных становятся базами знаний.

В ИС используются различные модели представления знаний, которые делятся на четыре класса: логические, сетевые, продукционные (синтез логических и сетевых) и фреймовые.

Логические и сетевые модели являются мощными средствами для представления знаний, однако они плохо описывают сложно структурированные объекты или явления [7]. Так, набор правил – это линейный список не связанных явным образом между собой записей. Логические системы также оперируют формулами, не объединенными в какую-либо структуру, а входящие в эти формулы высказывания или объекты просто представляются в виде атомарных символов. В семантических сетях положение узлов не фиксировано в пространстве, то есть при изоморфном отображении (с сохранением всех связей) мы получим совершенно другую по расположению элементов сеть, но представляющую те же знания, поскольку узлы и дуги в исходной и преобразованной сети одинаковы. При этом все узлы в сетевом представлении формально находятся на одном уровне детализации или абстракции. Это означает, что расположение узлов никак не упорядочено на основе таких отношений, как, например, «объект – класс». То есть, к примеру, понятия «природа» и «береза» располагаются в общей совокупности узлов. При этом, взяв некий узел, нельзя сказать, насколько абстрактное понятие он представляет (для этого придется тщательно исследовать все его связи).

То же самое относится и к другим «упорядоченным» отношениям, например, «объект – часть». Можно представить трехмерную семантическую сеть, в которой в зависимости от высоты меняется степень абстрактности понятий, либо же такую сеть, в которой узлы объединяются в группы иерархическим образом. Например, популярное представление знаний в виде онтологий зачастую является иерархической семантической сетью с определенным набором отношений. Однако в оригинальном сетевом представлении положение узлов не фиксируется и не используется при манипулировании со знаниями. Подобному расположению мешают также ситуации, представленные на рис. 3.

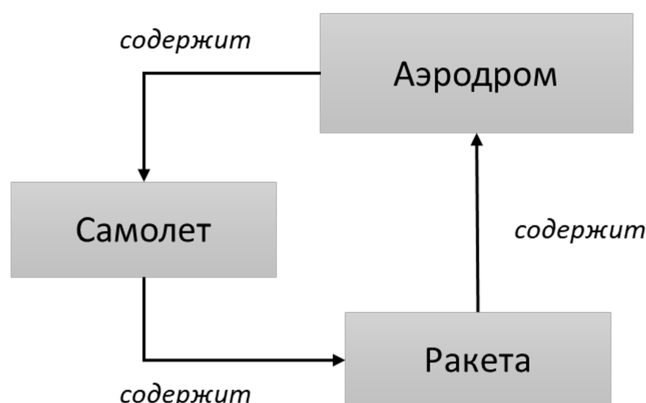


Рис. 3. Пример некорректно составленной семантической сети, возможная ошибочность которой не обнаруживается автоматически в рамках самого представления

Устранение таких ситуаций всецело возлагается на разработчика, но в самом сетевом представлении отсутствует какой-либо внутренний контроль его согласованности.

Особенно неэффективно с помощью логических и сетевых представлений описывать знания о пространственном расположении и структуре объектов. Предикат «слева» или аналогичным образом помеченная дуга в семантической сети в действительности не дают вполне ясного представления о понятии «левый» и «правый». Хотя существуют различного рода пространственные логики, они также являются достаточно абстрактными.

Представление объекта как единой целостности возможно с помощью фреймовых моделей.

В описании фрейма четко выделяется сама структура фрейма или его оболочка – протофрейм и собственно данные, описывающие конкретную реализацию фрейма – экзофрейм. В семантических сетях такое разделение на прототип и реализацию исходно не было преду-

смотрено, что вызывало некоторые трудности: с помощью семантических сетей можно описывать общие знания о мире, содержание некоторого рассказа или падежный фрейм, но нет четких правил, как использовать эти уровни описания одновременно. Протофрейм, как правило, представляет собой не просто перечень слотов, но также и некие значения по умолчанию для них – дефолты. Дефолты предусматривают в декларациях фреймов наиболее типичные значения атрибутов.

Таким образом, протофрейм описывает некое стереотипное представление об объекте или ситуации. Когда наблюдается конкретный объект или ситуация, то создается экземпляр фрейма, в котором значения слотов исходно установлены по умолчанию. По мере накопления данных эти значения могут уточняться. Некоторые слоты могут не иметь значений по умолчанию. К примеру, у автомобиля или одежды нет типичного цвета. Помимо значений по умолчанию для каждого из слотов могут указываться ограничения на его значение. Эти требования к фрейму позволяют определить, может ли некий объект по своим параметрам соответствовать данному фрейму, что позволяет выполнять своего рода распознавание. В качестве содержимого слота может выступать и другой фрейм, это обеспечивает возможность описывать структурированные объекты, состоящие из других объектов. Таким образом, отношение «состоит из», которое было в семантических сетях просто меткой на дуге, во фреймах реализуется фактическим помещением одного фрейма в другой.

Содержимое слотов-фреймов в протофрейме будет также пусто (если нет значений по умолчанию), однако при этом между протофреймами будет установлена связь. Таким образом, во фреймовых представлениях протофреймы являются не изолированными единицами знаний, а входят в общую систему. Однако одного типа связей между фреймами явно недостаточно, помимо отношения «состоит из», между фреймами могут устанавливаться и другие типы отношений – пространственные, временные, причинно-следственные, в результате чего фреймы образуют структуру типа семантических сетей. Однако в отличие от семантических сетей здесь возникает вопрос, как подобные отношения учитывать при создании экземпляров фреймов из протофреймов, где существенно повышаются требования к четкости спецификации сетевых отношений.

Отличительной особенностью фреймов является возможность присоединения к ним процедур, осуществляющих внутреннюю интерпретацию данных фрейма и описывающих их использование. В частности, процедурная информация помогает использовать произвольные типы отношений между фреймами. Таким образом, во фреймовых представлениях объекты и ситуации описываются в виде единых структур, в которых выделяется протофрейм (сама структура) и экзофрейм (ее наполнение); протофрейм представляет собой стереотипное представление об объекте, включающее информацию о типичных значениях своих слотов и присоединенные процедуры. Фреймы могут входить между собой в различные отношения, образуя структуру, подобную семантической сети. Фреймы бывают замкнутые или открытые, т.е. не допускающие или допускающие иные атрибуты в фактах, сверх указанных в декларации.

МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Учитывая предыдущие рассуждения, представление метеорологической информации в интеллектуальной системе автоматического управления БЛА целесообразно реализовать с помощью фреймовых моделей. Для этого рассмотрим пример.

Пусть БЛА в составе бортовой аппаратуры имеет:

- барометрический высотомер;
- датчики измерения температуры поверхности БЛА;
- датчики или зонды относительной влажности набегающего воздуха.

Тогда существует возможность определять метеорологические условия, в которых проходит полет БЛА. Барометрический высотомер позволяет получать значения атмосферного давления (P_a , гПа) на высоте полета БЛА. Современные датчики измерения температуры поверхности тел, например датчики класса «ТМ», позволяют определять степень нагрева лобовых ($T^{л.ч.}$, °С) и боковых ($T^{б.ч.}$, °С) частей БЛА. Большое многообразие гигрометров сегодня позволяет рассмотреть возможность их применения для измерения относительной влажности воздуха (f , %) по маршруту полета БЛА. Они бывают емкостные, резистивные, термисторные, оптические, электронные. Учитывая их принципы работы, в БЛА могут применяться термисторные, оптические и электронные гигрометры. С их помощью измеряют влажность различных материалов, а также воздуха и жидкости в набегающих потоках, например газонефтяных трубопроводах.

Если полет БЛА проходит на высоте менее 2000 м, то при наличии сплошной облачности при определенных условиях в облаках может возникнуть опасное явление – обледенение. При наличии системы датчиков измерений параметров, перечисленных выше, ИС БЛА может диагностировать вероятное обледенение и сформировать команду системе управления полетом на совершение маневра по выходу из опасной зоны.

Вначале необходимо определить значения кинетического нагрева лобовых ($\delta T^{л.ч.}$, °С) и боковых ($\delta T^{б.ч.}$, °С) частей БЛА при известных значениях скорости его полета (v , м/с) и относительной влажности окружающего его воздуха (f , %) по выражениям [10, 11]:

$$\delta T^{л.ч.} = \begin{cases} \frac{0,46 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f \geq 85\%, \\ \frac{0,765 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f < 85\%; \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta T^{б.ч.} = \begin{cases} \frac{0,36 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f \geq 85\%, \\ \frac{0,60 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f < 85\%. \end{cases} \quad (2)$$

Затем вычисляется значение температуры воздуха (T_v , °С):

$$T_v = T^{л.ч.} - \delta T^{л.ч.} \text{ или } T_v = T^{б.ч.} - \delta T^{б.ч.}. \quad (3)$$

По известным значениям температуры и относительной влажности воздуха рассчитываются значения дефицита точки росы (d , °С), например с использованием психрометрических таблиц [8], фрагменты которых могут содержаться в информационной базе ИС БЛА.

По формуле Годске вычисляется температура насыщения над льдом ($T_{н.л.}$, °С) [9, 10], которая сравнивается с температурой нагрева лобовых или боковых частей БЛА. Если $T_{н.л.} > T^{л.ч.}$ или $T_{н.л.} > T^{б.ч.}$, то на данном участке маршрута интеллектуальной системой БЛА диагностируются условия, соответствующие обледенению.

Представление метеорологической информации, рассмотренной в примере, можно реализовать с помощью следующих замкнутых фреймов.

1. Протофрейм «Условия обледенения».

Условия обледенения:

- обледенение возможно ($T_{н.л.} > T^{л.ч.}$ или $T_{н.л.} > T^{б.ч.}$);
- обледенение отсутствует ($T_{н.л.} \leq T^{л.ч.}$ или $T_{н.л.} \leq T^{б.ч.}$).

2. Протофрейм «Температура поверхности БЛА».

Температура поверхности БЛА:

- температура лобовой части (default) (6,2°С);
- температура боковой части (default) (5,8°С).

Слотам протофрейма присвоены значения по умолчанию, которые передаются с датчиков измерения температуры поверхности БЛА.

3. Протофрейм «Температура насыщения над льдом».

Температура насыщения над льдом:

- значение ($T_{н.л.} = -8 \cdot d$);
- дефицит точки росы (default) ($1,5^\circ\text{C}$).

Слоту «Дефицит точки росы» присвоено значение по умолчанию, в качестве которого может быть использован климатический показатель, хранящийся в информационной базе ИС.

4. Протофрейм «Дефицит точки росы».

Дефицит точки росы:

- значение $\{d | \text{tab}(T_B, f)\}$;
- температура воздуха ($T_B = T^{\text{л.ч.}} - \delta T^{\text{л.ч.}}$ или $T_B = T^{\text{б.ч.}} - \delta T^{\text{б.ч.}}$).

Запись $\{d | \text{tab}(T_B, f)\}$ означает, что d принимает такие значения, которые соответствуют d из психрометрических таблиц при известных значениях T_B и f .

5. Протофрейм «Относительная влажность воздуха».

Относительная влажность воздуха: значение (default) (80%).

6. Протофрейм «Кинетический нагрев поверхности БЛА».

Кинетический нагрев поверхности БЛА:

- скорость полета (default) (160 м/с);
- значение для лобовой части $\left(\begin{cases} \frac{0,46 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f \geq 85\% \\ \frac{0,765 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f < 85\% \end{cases} \right)$;
- значение для боковой части $\left(\begin{cases} \frac{0,36 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f \geq 85\% \\ \frac{0,60 \cdot v^2}{2000}, & \text{при } f < 85\% \end{cases} \right)$.

Использование фреймов требует фиксации их статусов в моделях представления знаний [6]. Простейшим статусом является статус истинности, т.е. предполагается, что все фреймы, которые в данный момент имеются в базе знаний ИС, абсолютно истинны, а те, которых там нет, – абсолютно ложны. Такая база знаний называется замкнутой, и ей соответствует замкнутая модель представления знаний.

Установим отношения между предложенными фреймами и представим их в виде замкнутой фреймовой модели (рис. 4).

Рассмотрим другой пример представления метеорологической информации в ИС автоматического управления БЛА с помощью фреймовых моделей.

Пусть БЛА оснащен оптической системой мониторинга поверхности Земли. В этом случае низкая облачность на траектории полета БЛА будет отрицательно влиять на качество ее функционирования. При наличии данных об относительной влажности воздуха (f , %) по маршруту полета БЛА и атмосферном давлении на высоте полета БЛА (P_a , гПа) ИС БЛА могут определять условия полета в облаках и вне облаков за счет использования известных в метеорологии принципов косвенного определения наличия облачности при росте относительной влажности и уменьшении атмосферного давления. Суть этих принципов состоит в следующем. Если

$$f_i \in \{f_1, f_2, \dots, f_n\}; P_a^i \in \{P_a^1, P_a^2, \dots, P_a^n\},$$

где n – число участков коррекции маршрута, то

- при $i + 1$, где $\{f_{i-1} < f_i \wedge P_a^{i-1} > P_a^i | f_i \geq 85\%\} \Rightarrow$ полет в облаках;
- при $i + 1$, где $\{f_{i-1} > f_i | f_i \geq 85\%\} \Rightarrow$ выход из облаков;
- при $i + 1$, где $\{f_{i-1} > f_i \wedge P_a^{i-1} < P_a^i | f_i < 85\%\} \Rightarrow$ полет вне облаков.

Другими словами, при перемещении БЛА от одного участка коррекции к другому, если относительная влажность воздуха увеличивается, атмосферное давление уменьшается, но при этом значения относительной влажности $\geq 85\%$, то интеллектуальной системой БЛА диагностируются условия, соответствующие полету в облаках.

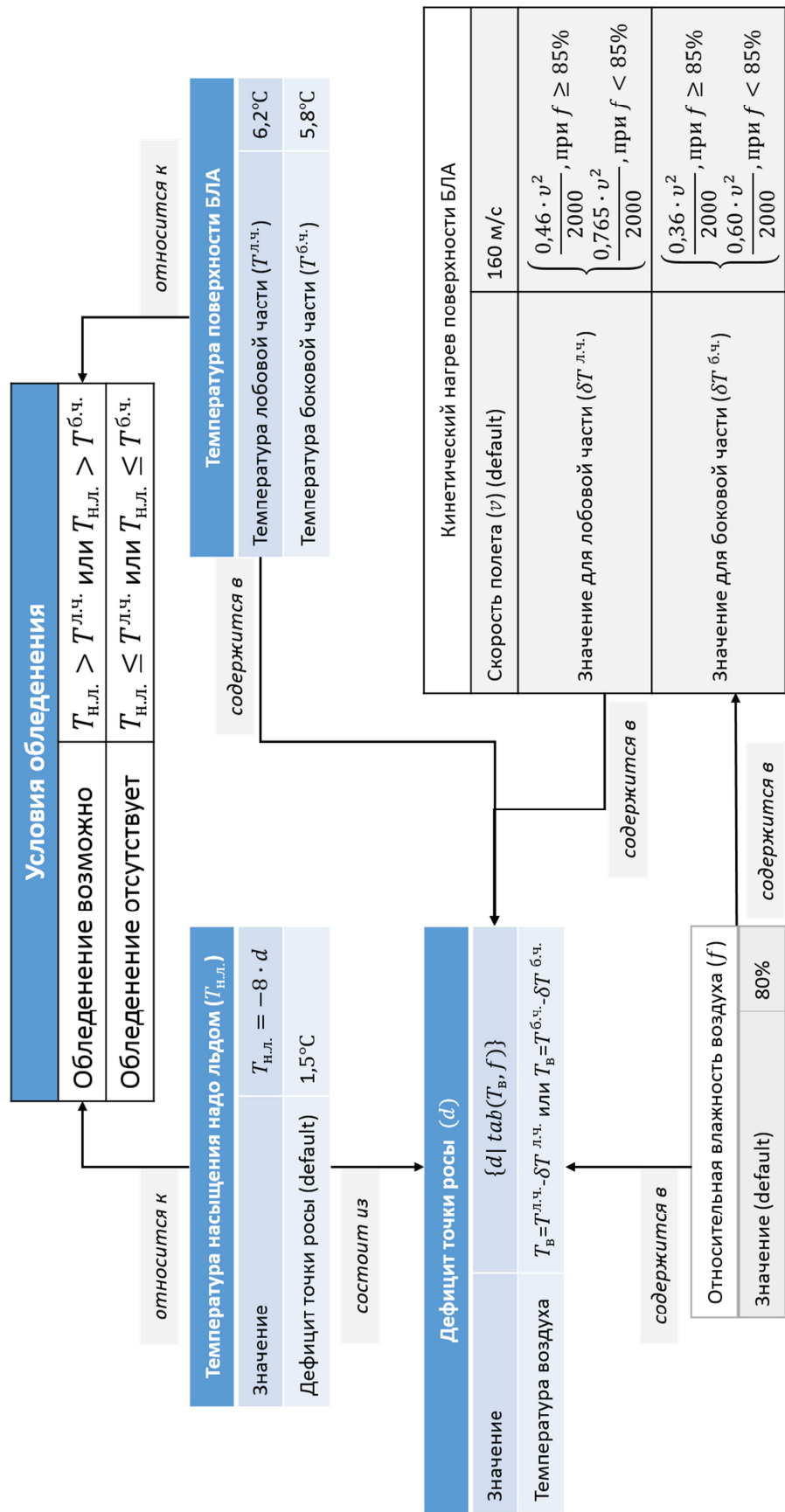


Рис. 4. Замкнутая фреймовая модель представления метеорологической информации в ИС автоматического управления БЛА при диагностике обледенения

Если относительная влажность воздуха уменьшается, но при этом ее значения $\geq 85\%$, то интеллектуальной системой БЛА диагностируются условия, соответствующие выходу ее из облаков.

Если относительная влажность воздуха уменьшается и ее значения $< 85\%$, атмосферное давление увеличивается, то интеллектуальной системой БЛА диагностируются условия, соответствующие полету вне облаков.

В приведенном примере представление метеорологической информации можно реализовать с помощью следующих замкнутых фреймов.

1. Протофрейм «Условия полета».

Условия полета:

- в облаках ($f_{i-1} < f_i \wedge P_a^{i-1} > P_a^i | f_i \geq 85\%$);
- выход из облаков ($f_{i-1} > f_i | f_i \geq 85\%$);
- вне облаков ($f_{i-1} > f_i \wedge P_a^{i-1} < P_a^i | f_i < 85\%$).

2. Протофрейм «История полета».

История полета:

- относительная влажность воздуха на шаге $i - 1$ (f_{i-1}) (...);
- атмосферное давление на шаге $i - 1$ (P_a^{i-1}) (...).

3. Протофрейм «Данные измерений с датчиков».

Данные измерений с датчиков:

- относительная влажность воздуха (f_i) (...);
- атмосферное давление (P_a^i) (...).

Объединим перечисленные фреймы и представим их в виде замкнутой фреймовой модели (рис. 5).

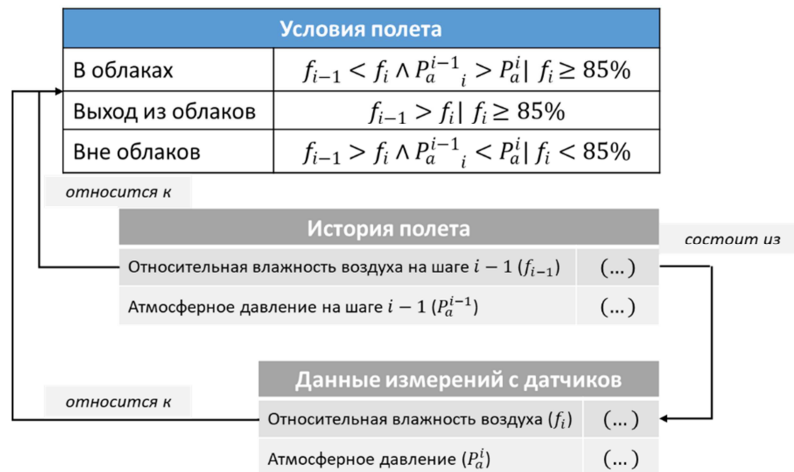


Рис. 5. Замкнутая фреймовая модель представления метеорологической информации в ИС автоматического управления БЛА при диагностике условий полета в облаках

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработаны и приведены примеры фреймов и фреймовых моделей представления метеорологической информации в ИС автоматического управления БЛА.

ИС автоматического управления БЛА – это программный комплекс, который оперирует знаниями в области управления БЛА в целях решения задач обеспечения максимальной точности навигации и устранения (компенсирования) случайных помех на траектории полета.

Потенциал интеллектуальных систем достаточно велик, они применимы для диагностики неисправностей на борту БЛА, коррекции полетного задания в зависимости от фоноцелевой обстановки, анализа наблюдаемых видеоаппаратурой сцен в условиях помех и т.п. При этом ИС должна прийти к какому-либо выводу и принять решение [1, 7].

Современные и перспективные ИС автоматического управления БЛА уже должны обладать таким основным функционалом, как приобретение знаний о метеорологических условиях, в которых проходит их полет (т.е. получение данных от различных бортовых датчиков и преобразование их в вид, позволяющий использовать эти знания в программе полета), представление этих знаний и управление процессом поиска решений, принятие решений.

Для функционирования ИС БЛА в метеорологических условиях различной степени сложности требуется наличие базы знаний о таких возможных условиях, подсистемы манипулирования этими знаниями и блока принятия решений.

База знаний о метеорологических условиях подразумевает использование одного или нескольких представлений знаний для описания данных об окружающей обстановке, примеры которых рассмотрены в настоящей статье.

Подсистема манипулирования знаниями необходима для поиска решения задачи навигации БЛА. При этом используются различные методы поиска в пространстве решений. Во многих случаях этот поиск представляется как логический вывод, который, однако, также требует привлечения методов эвристического программирования. Блок принятия решений осуществляет взаимодействие с системой управления БЛА, что необходимо не только для задач навигации, но также и для получения новых сведений самой ИС и записи их в память.

Список используемых источников

1. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.
2. *Лорьер Ж.-Л.* Системы искусственного интеллекта: пер. с фр. / под ред. В.Л. Стефанюка. – М.: Мир, 1991. – 568 с.
3. *Васильев В.Н., Павлов А.В.* Оптические технологии искусственного интеллекта: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 99 с.
4. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
5. *Домингос П.* Верховный алгоритм. – М.: Манн, Иванов и Фебер, 2016. – 336 с.
6. Искусственный интеллект: в 3 кн.: справочник / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – Кн. 2: Модели и методы. – 304 с.
7. *Потапов А.С.* Технологии искусственного интеллекта: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 218 с.
8. Психрометрические таблицы: справочное изд. – СПб.: ИТД «Летний сад», 2009. – 315 с.
9. Статистическое оценивание вероятности возникновения обледенения в атмосфере на основе схемы комбинации условий / С.Г. Алёхин, Ю.В. Кулешов, В.А. Шемелов, А.А. Туркин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – №655. – С. 54–69.
10. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 712 с.
11. *Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н.* Всепогодность радиолокационных и тепловизионных каналов наведения комплексов ПВО. – М.: Машиностроение, 2013. – 280 с.

Ю.И. Бова*;
 А.С. Крюковский*,
доктор физико-математических наук, профессор;
 Д.С. Лукин*,
доктор физико-математических наук, профессор
 *АНО ВО РосНОУ, г. Москва.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА СТРУКТУРУ РАДИОВОЛН В ОКРЕСТНОСТИ КАУСТИКИ

Рассмотрены особенности моделирования структуры волнового поля в окрестности каустики, возникающей в ионосфере вблизи поверхности Земли без учета радиоволн, отраженных от поверхности. Моделирование выполнено с учетом расходимости радиосигнала в ионосферной изотропной плазме и поглощения. Проведено сопоставление равномерного асимптотического решения, содержащего функцию Эйри и ее производную, и геометрикооптического (лучевого) решения. Предложена оценка поля на каустике на основе лучевого приближения. Расчеты проведены для модели ночной электронной концентрации и частоты соударений среднеширотной ионосферы.

Ключевые слова: численное моделирование, распространение, ионосфера, бихарактеристики системы, лучи, каустика, расходимость.

Рассмотрена структура волнового поля в окрестности каустики, возникающей в ионосфере вблизи поверхности Земли без учета радиоволн, отраженных от поверхности. Актуальность исследования каустических структур и полей на каустиках определяется тем, что огибающие лучевых семейств (каустики) разделяют всё пространство на области с различным характером распространения. Кроме того, поле на каустике заметно возрастает. Моделирование выполнено с учетом поглощения и расходимости радиосигнала в ионосферной изотропной плазме.

В работе описана модель изотропной ионосферной плазмы. Если внешнее магнитное поле отсутствует, то выражение для эффективной диэлектрической проницаемости имеет следующий вид [1, 2]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\nu}{1 + Z^2} - i \frac{\nu Z}{1 + Z^2}. \quad (1)$$

В формуле (1) параметры ν – это отношение квадрата плазменной частоты к квадрату рабочей частоты, а параметр Z – это отношение частоты соударений электронов к круговой рабочей частоте, т.е.

$$\nu = \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 = \frac{4\pi e^2 N(\vec{r})}{m_e \omega^2}, \quad Z = \frac{\nu_e}{\omega}. \quad (2)$$

В выражении (2) предполагается, что m_e – масса электрона; e – заряд электрона; c – скорость света; функция $N(\vec{r})$ – электронная концентрация в фиксированной точке пространства \vec{r} .

Выражение (1) можно представить в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_r + i \varepsilon_i, \quad (3)$$

где

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\nu}{1 + Z^2}, \quad \varepsilon_i = -\frac{\nu Z}{1 + Z^2} \quad (4)$$

являются действительной и мнимой частями эффективной диэлектрической проницаемости [1–6].

Для описания распространения декаметровых радиоволн в ионосфере Земли в данной работе применен лучевой подход – метод бихарактеристик Гамильтона – Лукина [3, 5].

Распространение электромагнитной волны изначально осуществляется в плоскости (x, z) . Источник излучения точечный, находится вне ионосферной плазмы и расположен в начале координат.

Рассмотрена модель высокоширотной ночной ионосферной плазмы (80° с.ш., 30° в.д., март). Профиль электронной концентрации имеет вид, представленный на рис. 1. На рис. 2 показана зависимость электронной частоты соударений от высоты [6].

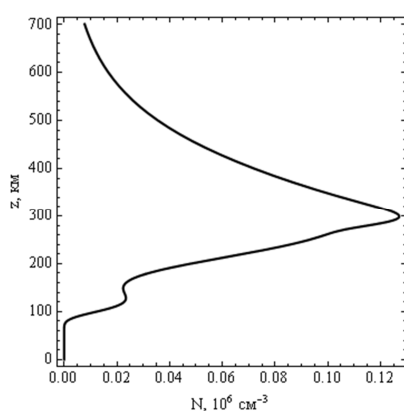


Рис. 1. Зависимость электронной концентрации от высоты

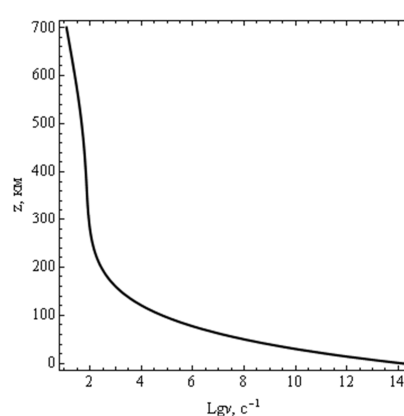


Рис. 2. Зависимость электронной частоты соударений от высоты

Приведем результаты численного моделирования. Рассмотрим распространение монохроматического сигнала с рабочей частотой $f=3,3$ МГц. На рис. 3 изображена лучевая структура радиосигнала в плоскости (x, z) , когда источник излучения находится на Земле. Угол выхода лучей меняется от 0° до 90° . В виде фона показана электронная концентрация ионосферы. В районе высоты 115 км находится слой E . На высоте порядка 300 км хорошо виден слой F . Лучи с небольшим углом выхода отражаются от слоев E и F и возвращаются на Землю, а лучи с большими углами выхода просачиваются сквозь ионосферу.

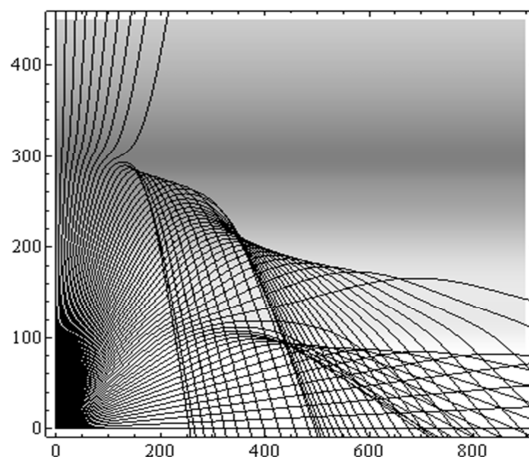


Рис. 3. Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z)

Из анализ рис. 3 следует, что семейство лучей образует сложную каустическую структуру, содержащую три каустических острия (волновая катастрофа \mathbf{A}_3 [5, 7]). Нижнее каустическое острие связано со слоем E , а два верхних определяются ионосферными слоями, образующими главный максимум. Нижние ветви каустика, формирующих особенности \mathbf{A}_3 , опускаются на Землю на расстояниях ~ 256 км, ~ 500 км и ~ 770 км. Проанализируем структуру волнового поля в окрестности первой каустики без учета поверхностной волны, влиянием которой на таких расстояниях при выбранной частоте передатчика можно пренебречь. Рассмотрим изотропный излучатель, который на расстоянии r_0 от источника создает электрическое поле E_0 , определяемое формулой

$$E_0 = \frac{\sqrt{30W}}{r_0} \text{ (В/м)}, \quad (5)$$

где W – мощность излучения, Вт;

r_0 – расстояние, м.

В данной работе предполагалось, что $W = 1$ кВт, а $r_0 = 1$ м.

Поле правее каустики определяется как сумма вкладов двух лучей:

$$u_g \cong b_1 \cdot \exp(i(\Phi_1 - \pi/2)) + b_2 \cdot \exp(i\Phi_2). \quad (6)$$

В формуле (6) амплитудные коэффициенты b_j имеют следующий вид:

$$b_j = E_0 \exp[-\psi_j] \sqrt{\left| \frac{J_0}{J_j} \right|}, \quad (7)$$

где ψ_j – поглощение, определяемое частотой соударения электронов (3);

J_j – якобиан расходимости, вычисленный в точке наблюдения;

J_0 – якобиан расходимости, вычисленный на расстоянии r_0 от источника [6].

Величина Φ_j – это фаза, вычисленная, как и поглощение, вдоль лучевой траектории.

В наших обозначениях первый луч – это луч, уже коснувшийся каустики. Якобиан расходимости определяется с помощью расширенной бихарактеристической системы Лукина [3, 6].

На каустике лучевое решение обращается в бесконечность, поскольку якобиан J_j обращается в нуль вследствие лучевой фокусировки. Хорошо известно [5, 8, 9], что поле на каустике и ее окрестности определяется с помощью функции Эйри и ее производной:

$$u_c \cong \exp(i\theta) \left(l_1 \cdot Ai(\lambda) - i l_2 \cdot \frac{dAi(\lambda)}{d\lambda} \right). \quad (8)$$

В выражении (8) фаза бегущей волны θ и аргумент функции Эйри λ в области двухлучевости определяются следующим образом:

$$\theta = \frac{1}{2}(\Phi_1 + \Phi_2), \quad \lambda = -\frac{3}{2^{4/3}} |\Phi_1 - \Phi_2|^{2/3}, \quad (9)$$

а коэффициенты l_1 и l_2 в первом приближении имеют вид:

$$l_1 \cong \frac{1}{2\sqrt{\pi}} (b_1 + b_2) \sqrt[4]{-3\lambda}, \quad l_2 \cong \frac{3}{2\sqrt{\pi}} (b_1 - b_2) \frac{1}{\sqrt[4]{-3\lambda}}. \quad (10)$$

Основная проблема определения поля на каустике связана с необходимостью вычисления в одной точке двух лучей, пришедших по разным траекториям, т.е. с решением задачи «пристрелки». Для нижних ветвей каустики это особенно сложно, так как каустика и лучи в ее

окрестности идут квазипараллельно друг другу и под большим углом к поверхности Земли. Поэтому в работе был реализован иной алгоритм. Сначала определялся угол луча, образующего каустику, лучевое семейство разделялось на два потока: лучи, коснувшиеся каустики и не коснувшиеся. Для каждого луча находилась точка его пересечения с поверхностью Земли и все его параметры в этой точке. Далее для каждого потока определялись интерполяционные формулы для фаз и амплитудных коэффициентов, после чего без труда в каждой точке находились два луча и вычислялись лучевое и каустическое поля. Реализация данного алгоритма являлась центральной частью данной работы.

На рис. 4 показаны результаты вычислений. Точкой на горизонтальной оси показано положение каустики. Выполнено сравнение поля на каустике (амплитуды), вычисленного по формулам метода равномерной асимптотики с помощью функции Эйри и ее производной (8), и с помощью лучевого приближения (6). Как и следовало ожидать, лучевое приближение совпадает с равномерной асимптотикой вплоть до склона главного максимума, причем максимальное значение смещено в область света относительно положения каустики. На каустике же амплитуда поля близка по значению к среднему значению амплитуды поля в области света.

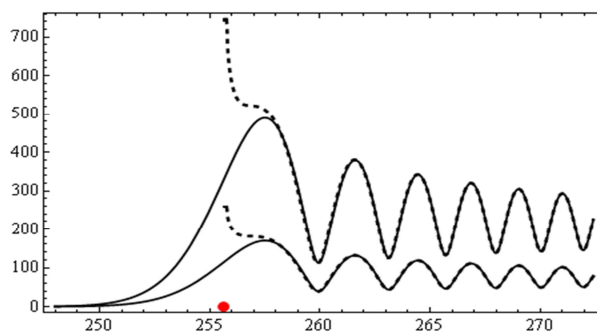


Рис. 4. Амплитуда модуля напряженности электрического поля, МкВ/м, от расстояния вдоль горизонтальной оси, км. Равномерная асимптотика (8) обозначена черными линиями; ГО приближение (6) – точечными линиями. Нижний рисунок выполнен с учетом поглощения

Видно, что для оценки поля в максимуме в окрестности каустики с помощью лучевого приближения достаточно найти место на графике, где кривая образует «полочку», прежде чем устремится на бесконечность.

Таким образом, можно оценить поле на каустике по геометрооптическому (лучевому) приближению, не прибегая к равномерным асимптотикам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-02-00544-а).

Список используемых источников

1. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
2. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 552 с.
3. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 9. – С. 1028–1034.

4. *Кирьянова К.С., Крюковский А.С.* Особенности лучевого распространения радиоволн в ионосфере Земли // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № 11. – С. 25–28.
5. *Лукин Д.С., Палкин Е.А.* Численный канонический метод в задачах дифракции и распространения электромагнитных волн в неоднородных средах. – М.: МФТИ, 1982. – 159 с.
6. *Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С.* Распространение частотно-модулированного излучения электромагнитных волн в ионосфере Земли с учетом поглощения и внешнего магнитного поля // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 3–14.
7. *Крюковский А.С., Лукин Д.С.* К вопросу о поле в окрестности каустического острия в ионосферном плазменном слое // Радиотехника и электроника. – 1981. – Т. 26, № 6. – С. 1121–1126.
8. *Кравцов Ю.А.* Об одной модификации метода геометрической оптики // Изв. вузов. Радиофизика. – 1964. – Т. 7, № 4. – С. 664–673.
9. *Kryukovskii A.S., Lukin D.S., Rastyagaev D.V.* Construction of uniform asymptotic solutions of wave-type differential equations by methods of catastrophe theory // Russian journal of mathematical physics. – 2009. – Vol.16, № 2. – P. 232–245.

А.А. Ганжа

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
имени В.Г. Мокерова РАН, г. Москва.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ МОЛНИЙ С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВО-СТРУКТУРНЫХ НИТЕЙ

В публикации рассматриваются уникальные свойства квантово-структурных нитей (КСН), выявленные при проведении экспериментов [1] по триггерному инициированию молний. Дается объяснение способностей КСН по инициированию:

- многократных разрядов молний в постгрозовой ячейке и негрозовых облаках;
- потоков быстрых электронов, позитронов, излучений рентгеновского и гамма диапазонов.

Ключевые слова: квантово-структурные нити, триггерное инициирование молний, быстрые электроны, позитроны, рентгеновское и гамма излучение.

ЧТО ТАКОЕ КВАНТОВО-СТРУКТУРНЫЕ НИТИ?

Квантово-структурные нити (КСН) являются достаточно новым инструментом исследований атмосферного электричества, поэтому в начале статьи целесообразно пояснить это понятие.

Под квантовыми структурами понимаются мелкие частицы, размеры которых хотя бы в одном направлении не превышают критических значений, при которых в данном направлении проявляются квантово-механические свойства. Для подавляющего большинства материалов критические размеры лежат в диапазоне от единиц до сотен нанометров. Поэтому их часто называют наноразмерными структурами, а объемные объекты, в состав которых они включены – наноструктурированными объектами. В статье используются термины «квантовые структуры» и «квантово-структурные», так как они точнее отражает физическую сущность эффектов.

Квантово-структурные нити – это нити, обладающие высокой эмиссионной и радиационной активностью, которая обеспечивается за счет реализации размерных (макро-, микро- и нанометрических) эффектов в элементах их конструкций, без использования радиоактивных изотопов химических элементов.

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТРИГГЕРНЫХ МОЛНИЙ

Метод триггерных молний был предложен для изучения атмосферного электричества Б. Франклином еще в 1750 г. [2, 3]. Запуская воздушного змея в грозу, он наблюдал разряды молний, исходящие от привязанной к змею веревки.

В 1960 г. метод был модифицирован – в грозовые облака стали запускать небольшие ракеты с прикрепленным тонким проводником [4, 5]. При подъеме ракеты на высоту более 100 м, между облаком и заземленным проводником происходил электрический пробой воздуха и формировалась триггерная молния. Необходимо обратить внимание, что, так же как при формировании естественных молний, триггерные пробои происходят при значениях электрической напряженности на 2-3 порядка меньше чем обоснованные в лабораторных экспериментах 30 кВ/см.

Кроме того, исследовались варианты внутриоблачного инициирования триггерных молний с помощью проводов, реактивных струй, объемных взрывов и создания других проводящих сред [6].

Триггерные эксперименты позволили детально исследовать физику атмосферного электричества, включая доказательство в XVIII в. идентичности природы атмосферного и технического электричества и обнаружение в XXI в. сопутствующих грозовым разрядам потоков быстрых электронов, позитронов, излучений рентгеновского и гамма диапазонов [7]. Рассмотренные в статье квантовые механизмы позволяют лучше понять явления, происходящие при триггерном инициировании, поэтому в конце статьи даются соответствующие комментарии к результатам, полученным традиционными методами.

ТРИГГЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С КВАНТОВО-СТРУКТУРНЫМИ НИТЯМИ

В 1998 г. были разработаны КСН, обладающие надповерхностной проводимостью. Их испытания на высоковольтных стендах (рис. 1) показали, что мощные электрические разряды протекают по ионизированной оболочке, возникающей вокруг поверхности нити. По этой причине КСН не перегорают при многократных искровых разрядах силой более 600 кА и должны выдерживать многократные разряды молний¹.



Рис. 1. Исследования КСН на высоковольтном стенде ВЭИ им. В.И. Ленина:
а – формирование стримерной оболочки вдоль поверхности КСН;
б – длительное протекание электрического тока по плазменной оболочке над поверхностью КСН

Начиная с 2004 г. удалось провести несколько полигонных испытаний вновь разработанных КСН. Испытания на Ржевском полигоне Минобороны России подтвердили гипотезы об уникальных способностях КСН по многократному инициированию грозовых разрядов и их способности вызывать молнии не только в грозовых облаках, но и в условиях хорошей погоды. Так, в эксперименте 2005 г. зафиксирована 1 триггерная молния в грозовом облаке мощностью 11 км, и еще 7 разрядов в той же ячейке при деградации облака до 2,7 км. Грозовая активность постгрозовой ячейки, содержащей КСН, наблюдалась более 20 мин.

В 2009 г. с помощью КСН была инициирована триггерная молния в облаке мощностью 6 км. По показаниям системы АЛВЕС это была единственная молния за сутки в радиусе более 500 км вокруг полигона.

В другом эксперименте 2009 г. (при слоистой облачности) были зафиксированы одновременные сбои всех восьми электронных приборов, обеспечивающих измерения и наблюдения

¹ Испытания КСН на электрическую прочность к разрядам более 600 кА не удалось организовать из-за отсутствия более мощных установок.

при проведении экспериментов. В том числе произошел трехминутный сбой работы специально предназначенных для наблюдений в условиях мощной грозовой активности метеорологической РЛС МРЛ-5 (на удалении 10 км) и флюксметра фирмы Vaisala (на удалении 3 км). Необходимо обратить внимание, что одновременно вышли из строя восемь приборов, аппаратура которых была защищена металлическими и пластиковыми корпусами. Это означает, что КСН сгенерировали излучения проникающих уровней, то есть более 100 кэВ, на удалении 10 км от источника излучения [7, 8]. Следовательно, с учетом затухания ионизирующего излучения в атмосфере, энергию первичных частиц можно оценить на уровне порядка 10 МэВ и более. Этот вывод подтверждается результатами зарубежных исследований. Например, в американских экспериментах по триггерному инициированию зафиксированы уровни излучений до 8 МэВ, а также потоки быстрых электронов и позитронов [7].

Излучения таких высоких уровней формируются за счет сочетания в конструкции КСН размерных эффектов, запускающих высокоэнергетические электронные и ядерные реакции. Так, испытания на атмосферно-оптическом стенде Института оптики атмосферы им. Зуева СО РАН (рис. 2) позволили выявить комптоновское и антикомптоновское уширение спектра лазерного излучения с длиной волны 800 нм, возникающее при повышении электрического потенциала КСН. В эксперименте использовались отрезки нитей длиной 10 м, а напряжение варьировалось в пределах ± 25 кВ, что соответствует максимальной напряженности поля 2,5 кВ/м. Это говорит об усилении интенсивности туннельной эмиссии электронов с острых краев квантовых структур КСН при повышении электрической напряженности в пределах атмосферных вариаций².

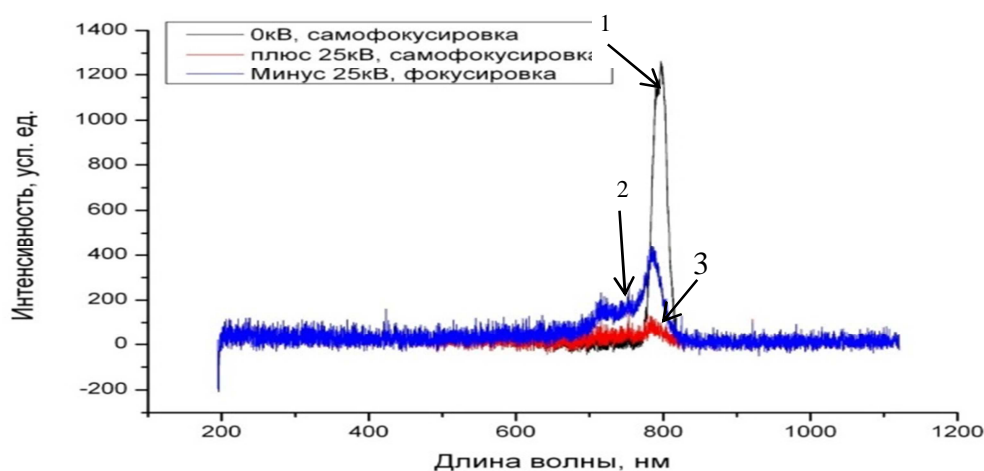


Рис. 2. Исследования квантово-структурных нитей на атмосферно-оптическом стенде Института оптики атмосферы им. Зуева СО РАН:

1 — до подачи напряжения на КСН спектр отраженного луча фемтосекундного лазера не изменяется; 2, 3 — после подачи напряжения на КСН луч взаимодействует со свободными электронами высоких энергий, что приводит к комптоновскому и антикомптоновскому уширению спектра

Следовательно, электрическое поле атмосферы способно вызвать интенсивную эмиссию электронов с поверхности КСН в пограничный слой воздуха. В относительно разреженной (по сравнению с водной и твердотельной средой) воздушной оболочке эмитированные электроны способны ускоряться внешним электрическим полем до релятивистских скоростей.

² Обязательным условием для возникновения внешней эмиссии является высокая диэлектрическая проницаемость остова КСН, которая препятствует внутреннему туннелированию электронов.

Потоки быстрых электронов могут отклоняться в атмосферу, формируя ионизирующие излучения проникающего уровня. При столкновении потоков с атомами КСН они будут ионизировать внутренние оболочки квантовых структур нитей.

Ионизация внутренних оболочек приводит к формированию рентгеновского характеристического излучения. При этом необходимо учесть, что эффекты магических чисел кристаллов³ и рентгеновской флуоресценции квантовых кристаллов⁴ повышают на несколько порядков энергию характеристического излучения КСН [10, 11]. В свою очередь, высокоэнергетические характеристические излучения квантово-структурных кластеров будут запускать еще более энергичные квантовые реакции. При повышении энергии частиц выше 3 МэВ запускаются ядерные реакции, включая реакции ядерного синтеза.

О ТРИГГЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ФАЛАМИ

Рассмотренные квантовые механизмы позволяют также уточнить интерпретацию результатов триггерных экспериментов с использованием обычных, то есть металлических фалов.

В традиционных вариантах с применением металлических проводов запредельные токи взрывают проводник. Поэтому электроны могут ускоряться до релятивистских скоростей только при формировании обратного удара с конца еще живого проводника, а также в остаточном ионизированном следе взорвавшегося проводника.

Для повышения прочности триггерных фалов в их конструкцию стали вводить арамидные нити. Такое нововведение приводит к увеличению продолжительности триггерных разрядов. Это связано со способностью диэлектрических нитей удерживать ионизированный след после взрыва металлического проводника.

Можно предположить, что сопутствующие триггерным молниям потоки быстрых электронов, позитронов, излучений рентгеновского и гамма диапазонов, возникают в области удара пучков высокоскоростных электронов по твердому телу триггерного фала или других рядом расположенных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить, что квантовые структуры играют важную роль в протекании природных процессов и находят всё более широкое применение в образцах современной техники. Это значительно повышает важность исследований атмосферных электрических процессов с помощью КСН. Для подтверждения важности таких исследований приведу два примера.

1. Использование квантово-структурных элементов относится к магистральным направлениям авиа- и ракетостроения, обеспечивающим качественный скачок по большинству важнейших ТТХ вновь разрабатываемых образцов. Вместе с тем, как показано в настоящей статье, их применение в конструкциях образцов могут сопровождаться непреднамеренными эффектами инициирования опасных проникающих излучений непосредственно на поверхностях самолетов и стартующих ракет.

³ Эффект магических чисел кристаллов проявляется, когда мелкие кристаллические частицы образуют устойчивые кристаллические кластеры, в которых энергия связи внутренних электронов существенно выше, чем у объемных материалов, соответственно возрастает энергия рентгеновских переходов.

⁴ Эффект рентгеновской флуоресценции квантовых кристаллов проявляется, когда близко расположенные (менее 2 нм) квантовые точки, стержни и плоскости объединяются посредством ионных и ковалентных связей в квантовые кристаллы. При этом формируются новые электронные оболочки, в результате энергия связи внутренних электронов возрастает. По этой причине частота флуоресценции квантовых кристаллов смещается в рентгеновский диапазон.

2. Капли и кристаллы воды, из которых состоят облака, также представляют собой квантово-структурные элементы. Можно предположить, что в определенных условиях они будут формировать излучения, обеспечивающие ионизационный принудительный пробой воздушных масс [12]. В пользу такой гипотезы говорят низкие напряженности возникновения молний, а также возникновение молний в ясную погоду и отклонения молний от громоотводов.

Таким образом, можно констатировать:

– инициирование триггерных молний с помощью квантово-структурных нитей открывает новые возможности в области экспериментального изучения важнейших атмосферных эффектов;

– ионизирующие излучения представляют высокую опасность для людей и объектов инфраструктуры [8, 9], поэтому при организации и проведении экспериментов с применением КСН требуется особое внимание обратить на обеспечение мер безопасности.

Список используемых источников

1. Ганжа А.А. Квантовые преобразования энергии атмосферы // Сборник трудов VIII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. – Нальчик, 2019. – С. 117–120.
2. The Pennsylvania Gazette. – 1752. – October 19.
3. Priestley J. The History and Present State of Electricity, with Original Experiments. – London, 1767. – P. 179–181.
4. Newman M.M. Lightning discharge simulation and triggered lightning // Planetary Electrodynamics. – V.I.N.Y.: Gordon and Breach Sci., 1970. – P. 213–219.
5. Мареев Е.А., Трахтенгерц В.Ю. Загадки атмосферного электричества // Природа. – 2007. – №3. – С. 24–33.
6. Бейтуганов М.Н. Исследование возможности инициирования искусственных молниевых разрядов: отчет о НИР №01890013516. – М.: ВНИИЦ, 1989.
7. Properties of the x-ray emission from rocket-triggered lightning as measured by the Thunderstorm Energetic Radiation Array (TERA) // Z. Saleh et al. // J. Geophys. Res. – 2009. – Vol. 114. – Doi:10.1029/2008/JD011618.
8. Черняев А.П. Ионизирующие излучения. – М.: ИД КДУ, 2014. – 314 с.
9. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 304 с.
10. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2010. – 336 с.
11. Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. – М.: Техносфера, 2010. – 252 с. [+15 с. цв. вклейки].
12. Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме: учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 160 с.

В.А. Гарбацевич*,
кандидат физико-математических наук;

Д.Е. Едемский*,
кандидат технических наук;

А.В. Попов*,
доктор физико-математических наук;

И.В. Прокопович*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, г. Троицк.

ОПЫТ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ВОЗДУШНОГО НОСИТЕЛЯ

На базе аппаратуры коммерческого георадара был создан макет бортового подповерхностного локатора. Для выбора антенной системы выполнялось моделирование нескольких конфигураций размещения передающей и приемной антенны. Ряд предварительных экспериментов, проведенных с применением подъемного крана, показал работоспособность предложенной системы при исследовании подземных структур в грунте на достаточном удалении от поверхности земли. Численно рассчитанные модельные радарограммы хорошо согласуются с полевыми данными и помогают в их интерпретации. Натурные измерения с радиолокационной аппаратурой, размещенной под вертолетом, подтверждают эффективность разработанной системы и возможность применения бортового георадара для обследования подстилающей поверхности в реальных условиях.

Ключевые слова: георадар, подповерхностное зондирование, вертолет.

ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи крупномасштабного обследования труднодоступных территорий традиционными наземными методами георадиолокации бывает затруднено, а иногда и невозможно. В качестве альтернативы может быть использована георадиолокационная система, установленная на летательном аппарате. В настоящее время в России и за рубежом применяются георадарные вертолетные системы с диапазоном рабочих частот 20–100 МГц для исследования ледников и снежного покрова [1, 2]. Наряду с этим всё более активно ведутся работы по применению беспилотных летательных аппаратов в качестве носителя георадара при зондировании Земли на частотах 100 МГц и выше. Данные системы применяются для измерения толщины снега, льда и для поиска объектов неглубокого залегания (1–1,5 м) в сухом грунте [3].

В первой части данной публикации описываются технические особенности резистивно-нагруженной антенной системы. Далее приводятся результаты модельного эксперимента с размещением георадара над зондируемой поверхностью. Результаты интерпретируются с помощью численного моделирования. В завершение представлены и обсуждаются результаты тестовых полетов на вертолете Ми-2 с георадарной подвеской.

ШИРОКОПОЛОСНАЯ РЕЗИСТИВНО-НАГРУЖЕННАЯ ДИПОЛЬНАЯ АНТЕННА

Измерительная система георадара воздушного базирования состоит из резистивно-нагруженных антенн, передающего и приемного устройств, размещенных на соответствующих антеннах, и блока регистрации и управления, находящегося в кабине вертолета.

Дипольная антенна с резистивной распределенной нагрузкой (антенна Ву – Кинга) замечательна тем, что при правильно выбранном законе возрастания удельного сопротивления в антенне формируется бегущая волна тока, затухающая во всем диапазоне рабочих частот, в

то время как у классического диполя волновая форма тока имеет осциллирующий характер. Аперриодические сигналы обладают существенно лучшим качеством по пространственному и временному разрешению по сравнению с осциллирующими сигналами. При разработке антенной системы для георадара воздушного базирования было решено развивать идею резистивно-нагруженных антенн, используемых для наземного георадара серии «Лоза».

При работе в диапазоне частот 10–50 МГц крайне важен учет таких факторов, как размеры антенной системы, их взаимное расположение и положение относительно вертолета. Анализ и разработка антенной системы проводились с применением программного комплекса «Mmana-gal-pro».

Компьютерное моделирование георадарных антенн позволило по распределению токов в полотне антенны подобрать нагрузку в резистивно-нагруженных диполях; рассчитать диаграммы направленности (ДН) антенн на фиксированных частотах; подобрать диаметр проводников в полотне антенны; проанализировать взаимное влияние приемной, передающей антенн и носителя. Размещение приемной и передающей антенн оказывает существенное влияние на ДН комплекса и может приводить к ее заметному искажению (рис. 1,а,б).

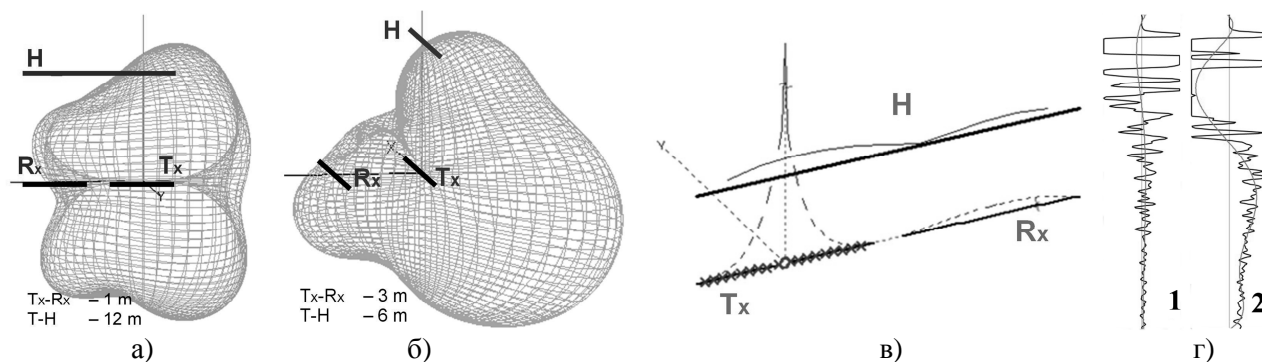


Рис. 1. Моделирование ДН антенн георадара на частоте 25 МГц:

а – антенны в одну линию; б – параллельно расположенные антенны; в – диаграмма распределения токов в антенне; г – «А»-скан; 1 – расстояние между антеннами порядка длины волны λ ; 2 – расстояние между антеннами меньше $\lambda/2$; Tx – передатчик; Rx – приемник; H – вертолет

Резистивно-нагруженный диполь имеет равномерное распределение коэффициента стоячей волны (КСВ) по всему диапазону частот в пределах 2,5–3,0, что уменьшает диапазон изменения коэффициента усиления антенны до (–24, –13) дБ. На основе анализа токов в антенне путем расчета и подбора параметров распределенной нагрузки удалось избежать резонансных явлений в антенне (рис. 1,в). При увеличении расстояния между антеннами до значений больше чем $\lambda/2$ удалось свести к приемлемому минимуму низкочастотную составляющую сигнала (обозначена 1 на рис. 1,г).

ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для проверки эффективности работы радара и оценки возможности его практического применения были проведены эксперименты на строительной площадке с использованием башенного подъемного крана высотой и длиной стрелы 40 м. На рис. 2,а показана схема постановки эксперимента. В 7 м от вертикали подъема антенны располагался железобетонный каркас первого этажа здания (высота 3 м). Подповерхностная среда представляет собой суглинок, верхний слой которого (частично) на глубину порядка 2 м был снят под монтаж цокольного этажа здания с последующей засыпкой грунтом. В данном эксперименте антенна плавно опускалась к земле с высоты 20 м.

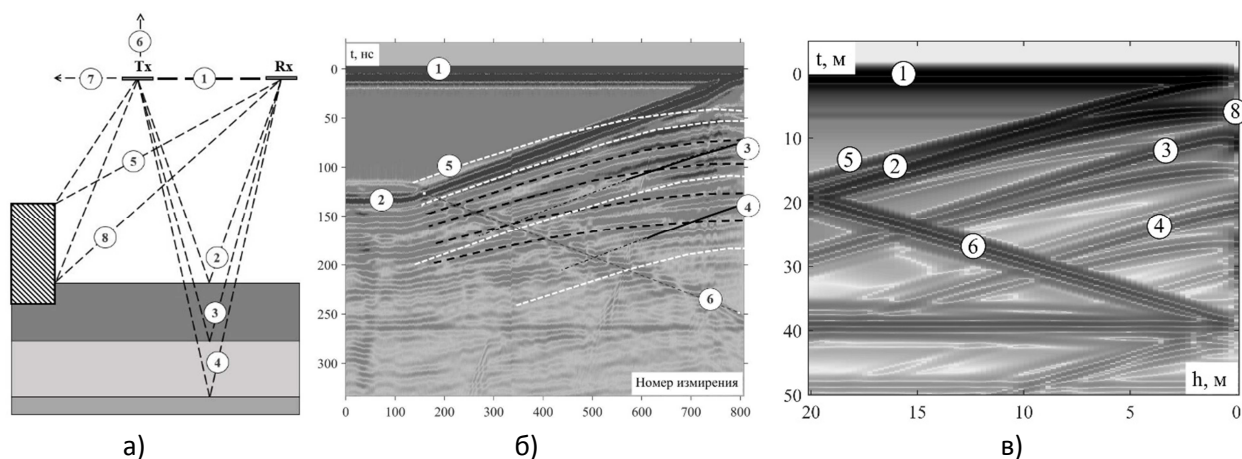


Рис. 2. Зондирование с изменением высоты подвеса антенны:

а – геометрия эксперимента; *б* – экспериментальный «Б»-скан; *в* – промоделированный «Б»-скан; 1 – зондирующий импульс; 2 – сигнал от поверхности земли; 3, 4 – сигналы от границ слоев; 5, 8 – сигналы от углов здания; 6 – сигнал от стрелы крана

Для анализа данных зондирования и интерпретации принятых сигналов было проведено двумерное моделирование средствами программного обеспечения «Gprmax» [4]. Структура грунта моделировалась плоскостойкой подповерхностной средой с двумя границами раздела на глубине 2,5 м ($\epsilon_1 = 14$) и 4 м ($\epsilon_2 = 9$). В качестве зондирующего импульса была взята модель $I(t) = -4\pi^2 f^2 (t - 1/f) \exp(t - 1/f)^2$, с $f = 25$ МГц. Результаты моделирования «Б»-скана с учетом влияния здания приведены на рис. 2, в.

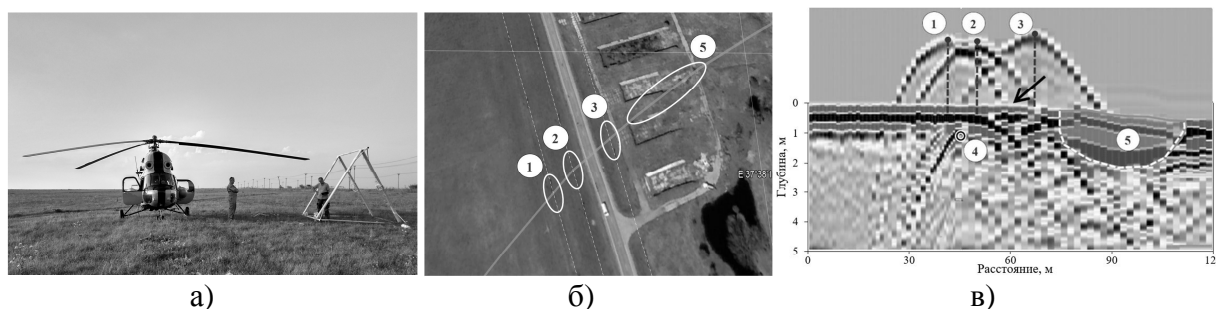
Анализ результатов показал, что максимальные по амплитуде сигналы поступают от внешних объектов. Сигналы от поверхности земли (2) и здания (5, 8) превышают на 16 дБ уровень сигнала (3) от границы раздела слоев на глубине 2,5 м и на 49 дБ сигнала (4) от границы раздела на глубине 4 м. При размещении антенны выше 10 м над поверхностью земли амплитуда сигналов от внутренней структуры подстилающей поверхности становится слишком малой на фоне сигналов от внешних объектов, что мешает их уверенной регистрации.

Приведенная двумерная модель относительно проста, но при сопоставлении результатов моделирования (рис. 2, в) с экспериментальными данными (рис. 2, б) результаты моделирования в целом соответствуют характеру отражений, зарегистрированных на реальном георадарном профиле. Поскольку при моделировании рассматривалась только двумерная модель (рис. 2, а), все сигналы от объектов, лежащих вне данной плоскости, не нашли своего отражения в модели. В реальности значимый вклад в волновую форму сигнала вносят отражения от линий примыкания боковых стен здания к земле, расположенных на расстоянии 6, 11 и 17 м от проекции антенны на землю (эти сигналы на рис. 2, б выделены черной пунктирной линией). Уровень данных сигналов [проекция (8) на рис. 2, а] на 12–15 дБ ниже уровня сигнала (2), отраженного от поверхности земли, но на 23 дБ выше уровня сигнала (5) от внешнего угла здания (рис. 2, б). Сигналы (6) от стрелы крана также видны на рис. 2, б; по результатам измерений они на 12 дБ ниже уровня отражений от поверхности земли (2) при высоте подъема антенны и расстояния до стрелы, равных 20 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Натурные испытания работы георадара были проведены в окрестности аэродрома Большое Грызлово, Калужская область, с использованием вертолета Ми-2 (рис. 3, а). Под измерительный комплекс был разработан и изготовлен стеклопластиковый каркас с учетом

аэродинамики воздушных потоков, формируемых винтом вертолета и встречным потоком воздуха. Антенны с центральной частотой 25 МГц были закреплены на капроновых тросах под вертолетом на расстоянии 12 м, использован импульсный передатчик (10 кВ), работающий в асинхронном режиме; ширина зондирующего импульса 7 нс, частота следования импульсов 1 кГц. Приемник прямого преобразования сигнала с полосой пропускания 20–350 МГц и 12-ти разрядным аналого-цифровым преобразователем обеспечивал частоту оцифровки входного сигнала 1 ГГц.



*Рис. 3. Зондирование поверхности земли с вертолета:
а – аэрогеорадарный комплекс; б – спутниковое изображение трассы
пролета вертолета; в – результаты зондирования, «Б»-скан; 1–3 – ЛЭП, 3 кВ;
4 – кабель; 5 – силосная яма, «Л» – дорога*

Грунты в районе аэродрома представлены суглинками со слабой стратификацией, $\epsilon \sim 14$, $\rho = 0,01\text{--}0,1$ См/м. Полеты выполнялись на высоте 10–70 м. Трассы проложены над близлежащими полями с погребенными оврагами и прудом на ручье Бредейский отвершек. Трасса, представленная на рис. 3,б, проходила над полем, автомобильной дорогой и заброшенными силосными ямами (5), высота полета 45 м. Вдоль дороги проходят три линии электропередач высотой 6 м (1, 2 и 3) [рис. 3,б] на расстоянии 28, 13 и 14 м от оси дороги, от которых на георадарном профиле (рис. 3,в) наблюдаются три гиперболы (1, 2 и 3). По характеру гипербол можно утверждать о симметричной форме ДН антенной системы относительно вертикали.

Радиообраз силосной ямы (5) хорошо прорисован на георадарном профиле (рис. 3,в), подшва засыпанной грунтом ямы расположена на глубине порядка 2–2,5 м (при $\epsilon = 14$) с уклоном в направлении от дороги. Автомобильная дорога прорисована недостаточно хорошо из-за большого шага измерений (порядка 2,5 м), однако гиперболы от обочины дороги достаточно четко указывают на ее расположение. С левой стороны от дороги, между ЛЭП, на глубине 0,7 м находится локальный объект (4) – кабель.

Одна из трасс полета проложена через пруд, расположенный вблизи аэродрома (рис. 4,а). Наземное георадиолокационное обследование данного пруда было проведено в зимнее время по льду (трасса А на рис. 4,а). Использовались антенны с центральной частотой 50 МГц, передатчик 5 кВ, шаг по профилю 0,2 м, длина трассы составила 200 м. На профиле, представленном на рис. 4,б, четко фиксируется структура дна (1) с максимальной глубиной 9,4 м. В нижней части водоема фиксируется ослабление сигнала, отраженного от дна, по видимому, из-за скопления ила. Наблюдаются сигналы в виде прямых наклонных линий (2) – отражение зондирующего импульса от правого и левого берега вдоль поверхности воды, которые существенно слабее сигналов от дна водоема.

В летнее время года было проведено обследование данного озера (трасса В, рис. 4,а) георадаром, размещенным на подвеске длиной 12 м, с центральной частотой 50 МГц и высотой полета 62–70 м. Результаты зондирования с минимальным объемом обработки приведены на рис. 4,в. По сравнению с наземными измерениями существенно вырос уровень помех (2, б) от ЛЭП и берега, вдоль которого проходит линия электропередач. Это объясняется диаграм-

мой направленности антенной системы. Существенно сказывается на результатах измерения влияние вертолета, а именно, отражение зондирующего импульса от его корпуса и винта (5). Следует отметить, что уровень сигнала от дна озера (3) (рис. 4,в) ниже, чем при измерениях с поверхности воды (1) (рис. 4,б). Снижение уровня сигнала вызвано ухудшением направленности антенны в сторону поверхности зондирования, ослаблением полезного сигнала за счет более высокого размещения георадара и ограниченной радиопрозрачности границы воздух – вода.

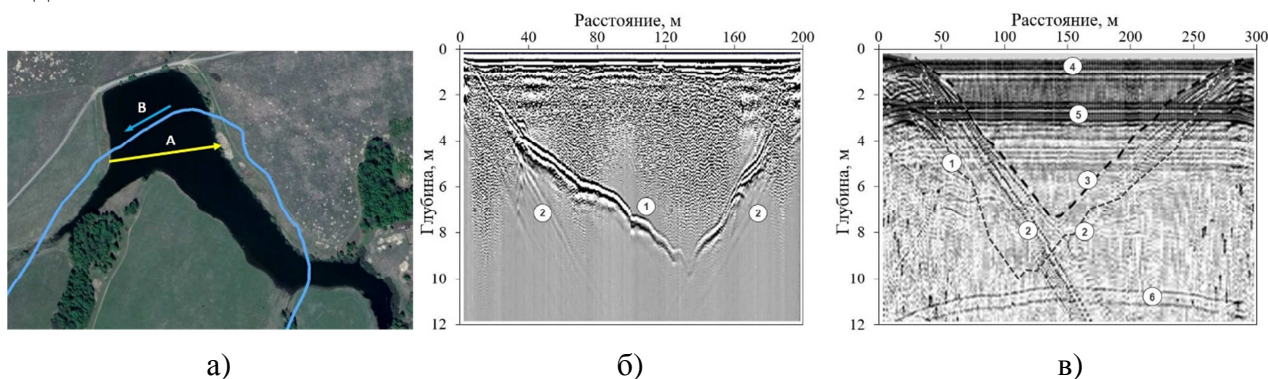


Рис. 4. Зондирование дна озера:

*а – спутниковое изображение; б – георадарный разрез со льда;
в – георадарный разрез с вертолета; 1 – контур дна озера, зондирование со льда
по трассе А; 2 – отражение от берега озера; 3 – дно озера, по данным зондирования
с вертолета по трассе В; 4 – поверхность озера; 5 – помеха, отражение
от вертолета; 6 – помехи от ЛЭП*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные результаты показали, что основные подповерхностные объекты регистрируются на радарограммах при работе с воздушного носителя. Понижение уровня сигнала при георадарной съемке с вертолета, по сравнению с результатами наземных измерений, вызвано рядом факторов: 1) расходимостью сигнала за счет приподнятости георадара над поверхностью земли; 2) ослаблением сигнала за счет отражения радиоволны от границы раздела воздуха и материальной среды; 3) ухудшением направленности антенной системы в сторону зондируемой среды. Также стоит отметить, что размещение антенны над зондируемой поверхностью приводит к возрастанию уровня помех от посторонних объектов, таких как ЛЭП, деревья, здания и т.д., что усложняет дешифровку радарограмм.

Естественным шагом для улучшения энергетического баланса и повышения глубины зондирования является понижение центральной частоты сигнала до 10–25 МГц (длительность зондирующего импульса 7–10 нс) и повышение его амплитуды до 10–20 кВ.

Теоретические оценки и практические результаты говорят о том, что георадар, размещенный на летательном аппарате, может получать геофизическую информацию приемлемого для практики качества.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00185.

Список используемых источников

1. Моноимпульсный радар для зондирования ледников с оптическим каналом синхронизации и цифровой обработкой сигналов / В.Ш. Берикашвили, Е.В. Василенко и др. // Радиотехника. – 2006. – № 9. – С. 52–57.

2. Pros and Cons in Helicopter-Borne GPR Data Acquisition on Rugged Mountainous Areas: Critical Analysis and Practical Guidelines / E. Forte, M. Basso Bondini et al. // *Pure and Applied Geophysics*. – 2019. – Vol. 176, №10. – 4533 p.
3. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping / K. Wu, G.A. Rodriguez et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – Vol. 235. – 111456 p.
4. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open Source Software to Simulate Electromagnetic Wave Propagation for Ground Penetrating Radar // *Computer Physics Communications*. – 2016. – Vol. 209. – P. 163–170.

И.А. Егошин*;
Е.Ю. Зыков**,
кандидат физико-математических наук, доцент;
А.А. Колчев**,
кандидат физико-математических наук, доцент;
А.Г. Чернов***;
В.В. Шумаев***

* Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола.

** Казанский федеральный университет, г. Казань.

*** ООО "СИТКОМ", г. Йошкар-Ола.

ЭФФЕКТ НЕВЗАИМНОСТИ ПРИ КВАЗИВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

Рассмотрена автоматизированная система зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией. Описана схема эксперимента по квазивертикальному зондированию ионосферы. Экспериментально показано, что отсутствует взаимность в характеристиках распространения сигналов при смене направления распространения. Этот эффект объясняется различием в набеге фаз из-за вращения плоскости поляризации. Приведены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: модель радиоканала, многолучевость, наклонное зондирование, линейная частотная модуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие магнитного поля Земли на распространяющуюся в ионосфере электромагнитную волну приводит к тому, что характеристики сигналов, идущих в противоположных направлениях, могут различаться. Эффекты воздействия магнитного поля – магнитоионное расщепление и вращение плоскости поляризации линейно поляризованной волны [1]. Эти эффекты могут менять характеристики сигналов на наклонных радиотрассах при изменении направления излучения (пункты приема и излучения меняются местами).

В последнее время в радиосвязи, радиолокации и радионавигации ДКМ диапазона волн интенсивно внедряются широкополосные электронные радиотехнические системы, использующие сигналы с расширенным спектром (широкополосные системы). Применение широкополосных систем позволяет существенно повысить надежность и помехоустойчивость систем связи, улучшить метрологические характеристики загоризонтных радиолокационных систем с одновременным уменьшением их масс габаритных характеристик и энергопотребления [2]. Перспективными являются ионосферные станции, использующие для диагностики ионосферных радиолиний широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [3, 4].

В данной публикации рассматриваются эффекты невзаимности при распространении сигналов ЛЧМ на квазивертикальных радиолиниях.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И АППАРАТУРА ЗОНДИРОВАНИЯ

Геометрия экспериментальной радиотрассы показана на рис. 1. Излучение и прием сигнала происходил в пунктах г. Йошкар-Ола ($56^{\circ}37'12''N$, $47^{\circ}52'12''E$) и г. Казань ($55^{\circ}48'0''N$, $49^{\circ}7'12''E$). Азимут радиотрассы Йошкар-Ола – Казань $\sim 140^{\circ}$. Расстояние между пунктами излучения и приема 121 км. Середина радиотрассы имеет географические координаты $56^{\circ}12'42''N$ и $48^{\circ}30'6''E$. Синяя стрелка на рис. 1 показывает направление горизонтальной со-

ставляющей вектора магнитного поля Земли в указанной точке (азимут $\sim 14^\circ$). Угол между радиотрассой Йошкар-Ола – Казань и направлением горизонтальной составляющей магнитного поля составил 126° , а между радиотрассой Казань – Йошкар-Ола и направлением магнитного поля – 56° . Оба пункта оснащены аппаратурой наклонного зондирования сигналами с ЛЧМ фирмы «SITCOM».

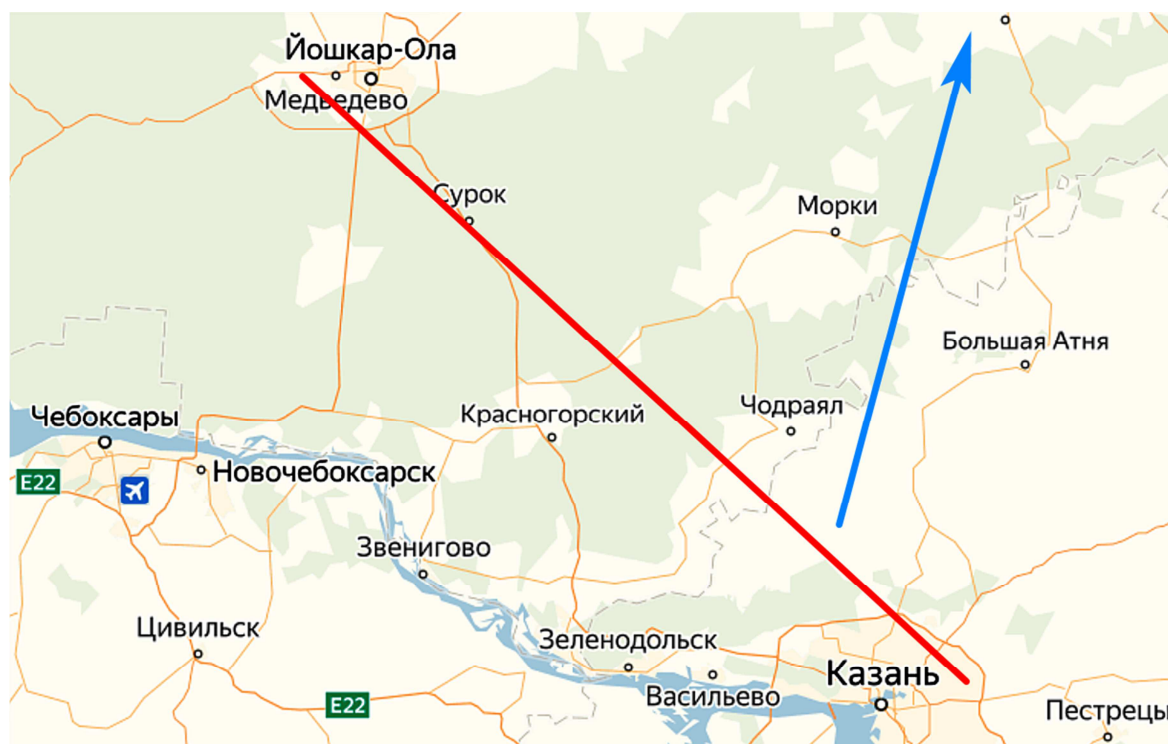


Рис. 1. Схема эксперимента

В настоящее время фирма «SITCOM» изготавливает автоматизированную двухканальную аппаратуру зондирования ионосферы (АЗИ) сигналами с ЛЧМ на базе стандартного КВ радиооборудования фирмы «ICOM» (Япония).

Фотография однопозиционного варианта автоматизированной двухканальной аппаратуры зондирования ионосферы представлена на рис. 2.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент с использованием описанной аппаратуры проходил 27.11.2019 в двухминутном режиме: в четные минуты излучение ЛЧМ сигнала осуществлялось в пункте Казань, а прием – в пункте Йошкар-Ола, в нечетные минуты излучение ЛЧМ сигнала осуществлялось в пункте Йошкар-Ола, а прием – в пункте Казань. Зондирование ионосферы выполнялось в диапазоне частот от 2 до 7 МГц со скоростью перестройки частоты 90 кГц/с. В пункте Йошкар-Ола была антенна типа диполь, а в пункте Казань – антенна типа луч. В каждом пункте излучался и принимался сигнал с линейной поляризацией. Трассы 1 и 2 можно определить как квазивертикальные – происходит наклонное падение волны на слой, но распространение верхним лучем (мода Педерсена) не наблюдается.

На рис. 3,а–д приведены фрагменты ионограмм, содержащие частотные диапазоны с разделенными магнитоионными компонентами, распространявшимися через слой F2.



Рис. 2. Однопозиционный вариант автоматизированного двухканального АЗИ

На рис. 3,а,с показана радиотрасса Йошкар-Ола – Казань (трасса 1) в 8 ч 33 мин и в 8 ч 35 мин, а на рис. 3,б,д – радиотрасса Казань – Йошкар-Ола (трасса 2) в 8 ч 34 мин и в 8 ч 36 мин UTC соответственно. На этих рисунках по горизонтальной оси откладывается частота зондирования в МГц, а по вертикальной – время группового запаздывания в миллисекундах.

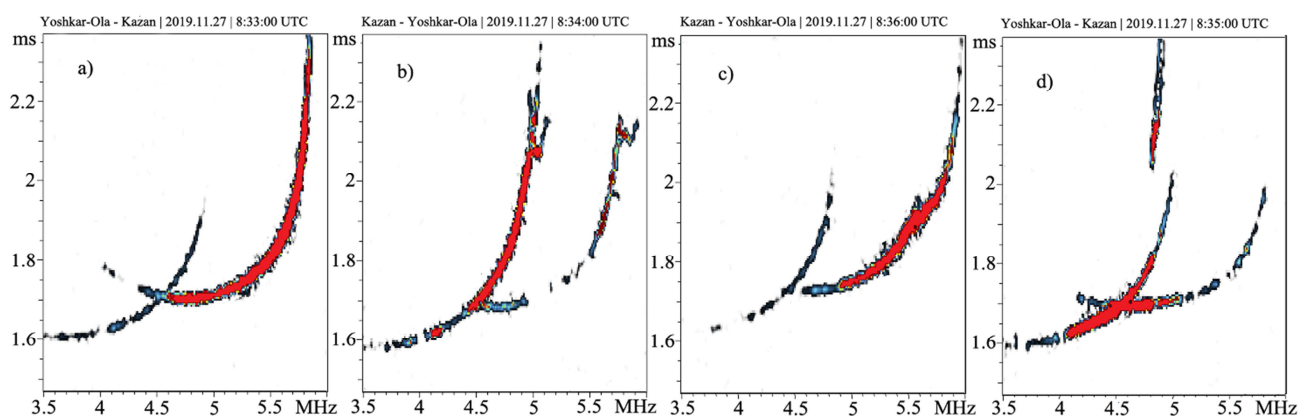


Рис. 3. Фрагменты ионограмм, полученных в эксперименте:
а, с – радиотрасса Йошкар-Ола – Казань; б, д – радиотрасса Казань – Йошкар-Ола

Из рис. 3 следует, что для радиотрассы 1 на высоких частотах амплитуда O компоненты A_O существенно меньше амплитуды X компоненты A_X , а для противоположного распространения сигнала (радиотрасса 2) меньше амплитуда X компоненты: $A_{O1} < A_{X1}$, $A_{O2} > A_{X2}$, где A_{O1} , A_{X1} – амплитуды O и X компонент на трассе 1 соответственно, а A_{O2} , A_{X2} – амплитуды O и X

компонент на трассе 2. Кроме того, наблюдается изменение соотношения амплитуд между модами. На рис. 4,а показаны частотные зависимости отношения амплитуд O компонент A_{O1}/A_{O2} для ионограмм, полученных в 8 ч 33 мин и 8 ч 34 мин (цифра 1), и для ионограмм, полученных в 8 ч 35 мин и 8 ч 36 мин (цифра 2). На рис. 4,б показаны частотные зависимости отношения амплитуд X компонент A_{X1}/A_{X2} для ионограмм, полученных в 8 ч 33 мин и 8 ч 34 мин (цифра 1), и для ионограмм, полученных в 8 ч 35 мин и 8 ч 36 мин (цифра 2).

Из рис. 4,а следует, что ход частотной зависимости может меняться с убывающей (цифра 1) на возрастающую (цифра 2) зависимость. Так как излучается линейно поляризованная волна, то такие амплитудные вариации можно объяснить вращением плоскости поляризации при распространении электромагнитной волны в ионосфере.

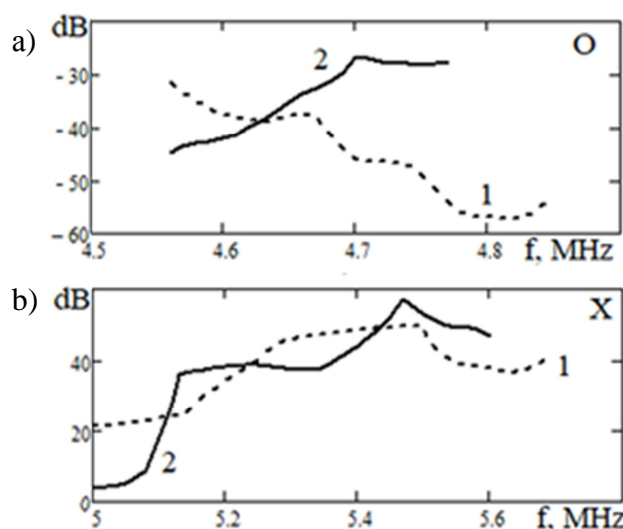


Рис. 4. Зависимости отношения амплитуд

Угол поворота плоскости поляризации волны, излученной передатчиком, находится по формуле

$$\vartheta = \frac{e^3}{2\pi c^2 m^2} \frac{1}{f^2} \int_{L_1}^{L_2} H_L N dl. \quad (1)$$

Здесь ϑ — угол поворота плоскости поляризации при прохождении радиоволнами вдоль луча расстояния L_2-L_1 при произвольном направлении распространения радиоволн относительно магнитного поля;

e, m — заряд и масса электрона;

H_L — компонента магнитного поля вдоль направления распространения;

N — электронная концентрация.

В данном эксперименте предполагается постоянство за время зондирования пространственного распределения H_L и N . Формула (1) показывает, что при этих предположениях на трассах 1 и 2 должны различаться траектории распространения радиоволн.

Как указано в [1], невзаимность связана с поляризационными свойствами волн и антенн. Изменению амплитуды на рис. 4 соответствуют изменения в угле поворота плоскости поляризации ϑ . Используя формулу (1), по этим данным можно оценивать изменения характеристик ионосферной плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В публикации представлена схема эксперимента по исследованию невязности при ионосферном распространении радиоволн. Рассматриваются экспериментальные результаты квазивертикального зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ. Показано, что предлагаемая схема исследования имеет высокую чувствительность к вариациям характеристик среды распространения.

Список используемых источников

1. *Davies K.* (1990) *Ionospheric Radio*. Peter Peregrinus Ltd., London. – URL: <http://dx.doi.org/10.1049/PBEW031E> (дата обращения: 15.04.2020).
2. The DST Group high-fidelity, multichannel oblique incidence ionosonde / J.K. Ayliffe, L.J. Durbridge, G.J. Frazer et al. // *Radio Science*. – 2019. – Vol. 54. – P. 104–114. – URL: <https://doi.org/10.1029/2018RS006681> (дата обращения: 15.04.2020).
3. A Novel Ionospheric Oblique-Incidence Sounding Network Consisting of the Ionospheric Oblique Backscatter Sounder and the Parasitic Oblique-Incidence Sounder IEEE // *Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2015. – October 12(10):1-5. – Doi:10.1109/LJRS.2015.2447524.
4. Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels / V.P. Uryadov, F.I. Vybornov, A.A. Kolchev et al. // *Advances in Space Research*. – 2018. – Vol. 61, № 7. – С. 1837–1849.

А.А. Калинин*,

кандидат физико-математических наук;

Б.Г. Кутуза*,

доктор физико-математических наук, профессор;

В.Ю. Манаков**;

В.М. Масюк*,

кандидат физико-математических наук;

В.А. Плющев**,

кандидат технических наук

*Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва.

**Акционерное общество «Концерн радиостроения "Вега"», г. Москва.

О КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА КАЧЕСТВО СИНТЕЗИРОВАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Проблемы по преодолению деструктивного влияния ионосферы на работоспособность космической радиолокационной станции (РЛС) с синтезированной апертурой (РСА), работающей в Р- и VHF-диапазонах, прорабатываются как зарубежными, так и российскими специалистами. Для уменьшения этого влияния используется метод автофокусировки, который успешно применяют в самолетных РСА для компенсации флуктуаций движения носителя. Однако анализ деструктивного влияния ионосферы на работоспособность космической РСА («МКС-РСА(Р)»), работающей в Р-диапазоне, показал, что для успешного использования этого подхода в выполнении космического эксперимента требуются дополнительные исследования свойств ионосферы. Такие исследования могут быть проведены непосредственно в ходе выполнения космического эксперимента (КЭ) с помощью создания специализированных наземных полигонов, аппаратура которых будет работать по программе, согласованной с функционированием РСА Р-диапазона. Эксперимент с помощью РСА «МКС-РСА(Р)» в районе наземного полигона в первую очередь следует рассматривать как разработку методики по дополнительному исследованию ионосферы в целях дистанционного зондирования поверхности с помощью РСА Р-диапазона.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, ионосфера Земли, разрешающая способность по наклонной и путевой дальности, фазово-градиентная автофокусировка, активный калибратор со специфическими возможностями.

ВВЕДЕНИЕ

Трудности проведения КЭ в Р-диапазоне связаны с сильным влиянием ионосферы при прохождении электромагнитного излучения через нее. В этом смысле ионосфера представляет собой сложный фильтр, при прохождении через который меняется длительность и огибающая ЛЧМ импульса, частотное заполнение свертки, поляризация электромагнитных излучений (ЭМИ). Кроме того, в ионосфере наблюдаются пространственно-временные неоднородности, а ее характеристики зависят от широты и солнечной активности [1].

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ НАЗЕМНЫХ ПОЛИГОНОВ

Проблемы по преодолению деструктивного влияния ионосферы на работоспособность космической РЛС с синтезированной апертурой (РСА), работающих в Р- и VHF-диапазонах, прорабатываются как зарубежными, так и российскими специалистами [2–7]. В качестве основы используется метод фазовой градиентной автофокусировки, который успешно применяется при получении синтезированных изображений в самолетных комплексах РСА,

необходимых для компенсации флуктуаций движения носителя. Авторы [6, 7] основное внимание уделяли свертке по азимуту. При этом амплитудные флуктуации, а также флуктуации длительности импульса не рассматривались. Наиболее продвинутой методикой по компенсации влияния ионосферы на РЛИ, по мнению авторов настоящей публикации, представлена в работах [2–4]. В [2–4] рассматривался двумерный адаптивный, итерационный метод по компенсации ионосферного деструктивного влияния на формирования РЛИ. Рассмотрение проводилось в предположении, что используются ЛЧМ импульсы с круговой поляризацией вращения ЭМИ. В этих работах в голограммы, полученные в ходе самолетных экспериментов, вносились флуктуации фазы эксперимента [5]. Было показано, что формирование синтезированного изображения по дальности и по азимуту следует рассматривать как единое целое. В результате авторы [2–4] показали, что деструктивное влияние ионосферы может быть сведено до минимума. Однако при рассмотрении компенсации ионосферного влияния не учитывались возможные амплитудные искажения и флуктуации длительности импульса. Вопросы влияния двойного прохождения ЭМИ через одни и те же ионосферные неоднородности, влияния возможных особенностей отражения от земной поверхности на флуктуацию фазы, принцип взаимности прохождения ЭМИ на трассах спутник – Земля и Земля – спутник не затрагивались. Кроме того, вопросы о частоте и величине колебаний фарадеевского угла вращения плоскости поляризации Ω , флуктуации фазы на интервале синтеза изображения по азимуту остаются открытыми.

В качестве примера можно привести анализ данных [5]. В [5] представлены результаты измерения флуктуации фазы для сигналов Р-диапазона круговой поляризации на временном интервале ≈ 10 с (рис. 1,а), а также результаты для первой 5-секундной (рис. 1,б) и второй частей (рис. 1,в).

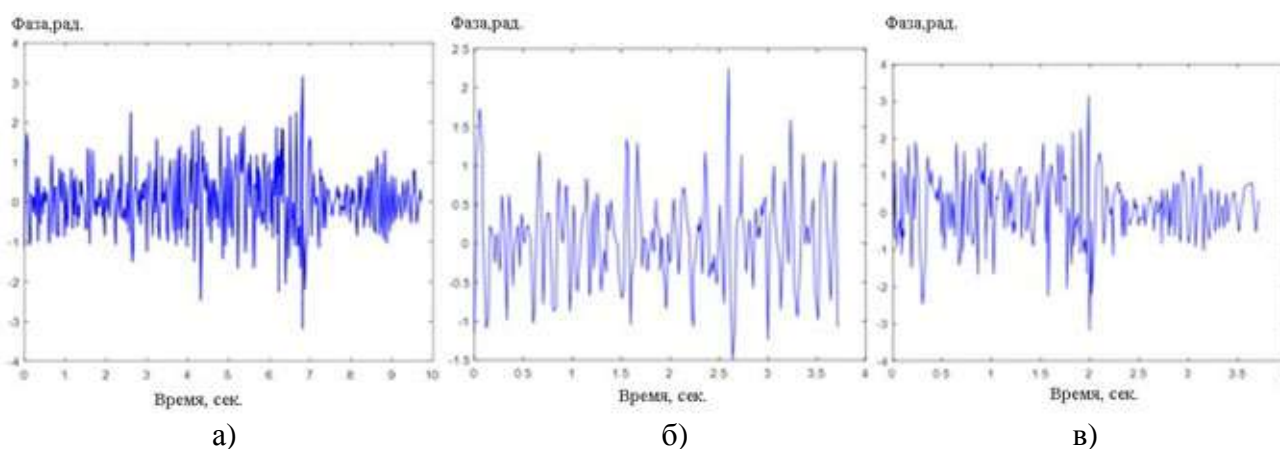


Рис. 1. Зависимость флуктуаций, обусловленных мелкомасштабными неоднородностями ионосферы, монохроматического сигнала на частоте 417 МГц при приеме сигнала круговой поляризации. Коэффициент корреляции для результатов, представленных на рис. 1,б,в, – $R=0,016$

Используя полученные зависимости, можно вычислить спектр флуктуаций на интервале 10 с $S(f)$ и на двух близлежащих 3- и 7-секундных интервалах $S_1(f)$ и $S_2(f)$. Результаты показывают: а) спектры флуктуаций фазы превышают спектр доплеровских частот РСА, б) коэффициент корреляции $S_1(f)$ и $S_2(f)$ близок к нулю $R \approx 0,016$. Сопоставление спектров после выполнения усреднения их спектров скользящим окном по четырем измерениям представлено на рис. 2. Анализ рисунка показывает, что можно выделить две полосы частот Δf_1 (0–0,05 Гц) и Δf_2 (0,05–0,14 Гц). В полосе частот Δf_1 коэффициент корреляции $R_1 \approx 0,65$, а в полосе частот Δf_2 (0,05–0,14 Гц) $R_2 \approx 0,01$. Таким образом, результаты, получен-

ные в [5], соответствуют прохождению ЭМИ как через крупные неоднородности ионосферы, так и через мелкомасштабные.

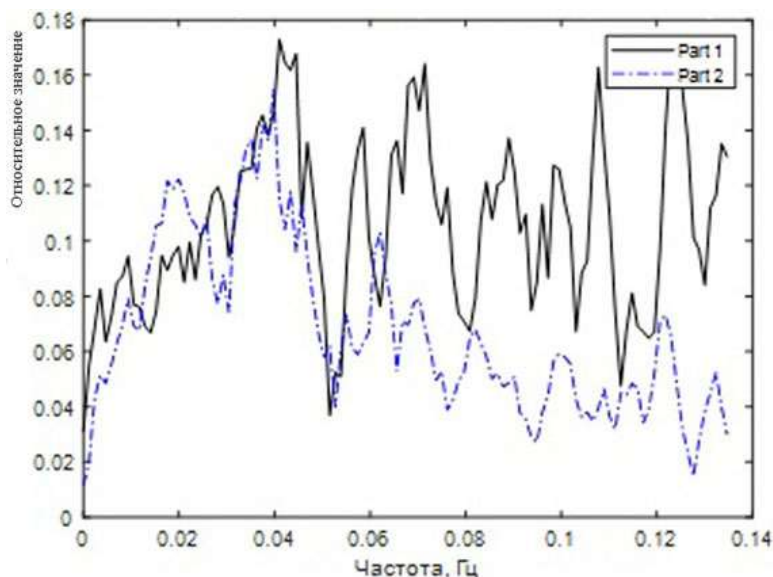


Рис. 2. Спектры флуктуации фазы двух частей и их сопоставление

Поэтому требуется разработка метода компенсации ионосферного деструктивного влияния при радиолокационной съемке протяженного участка поверхности. Связано это с тем, что предложенный метод непрерывно должен сам адаптироваться к случайной временной зависимости флуктуации фазы. Кроме того, необходимо выяснить закономерности вращения плоскости поляризации сигнала от шероховатой поверхности. Следует также отметить, что фазово-градиентную автофокусировку можно эффективно использовать при наличии на местности отдельных малоразмерных объектов, имеющих повышенную отражательную способность.

Для более успешного использования комплекса научной аппаратуры «МКС-РСА(Р)» при выполнении космического эксперимента предполагается провести дополнительные эксперименты по изучению влияния ионосферы и особенностей отражения от подстилающей поверхности на синтезированные радиолокационные изображения. Такие исследования могут быть проведены с помощью создания наземных полигонов. Наземное оборудование должно работать в разных режимах по программе, согласованной с режимом работы РСА Р-диапазона. Совместная работа бортовой и наземной аппаратуры должна быть направлена на изучение влияния ионосферы, отражения от поверхности Земли, для выполнения внешней калибровки РСА.

Как правило, наземные полигоны оснащаются набором уголковых отражателей и/или активными калибраторами, позволяющими принимать сигналы от РСА, усиливать и излучать их обратно после временной задержки. Для космического варианта в Р-диапазоне в случае использования линейных поляризаций приемно-передающие устройства активного калибратора должны оснащаться двумя ортогональными каналами. В каждом канале выполняется цифровая регистрация сигнала на несущей СВЧ частоте, обработка принимаемого сигнала и дальнейшее переизлучение в соответствии с режимом работы. Вид передающих СВЧ сигналов активного калибратора должен меняться в зависимости от поставленной задачи, синхронно с работой РСА.

Частотные компоненты ЛЧМ зондируемого сигнала распространяются в ионосфере с разной скоростью, кроме того, по-разному затухают. Таким образом, форма сигнала и закон частотного заполнения претерпевают изменения. Несмотря на то, что частотная полоса

зондируемого сигнала относительно узкая (6–50 МГц), расстояние от МКС до Земли и обратно составляет около 900 км. Поэтому эффективная длительность зондируемого импульса по мере прохождения ионосферы меняется, меняется закон частотной модуляции, меняется и амплитудная форма импульса. Кроме того, происходит смещение МКС от импульса к импульсу, а также поворот плоскости поляризации ЭМИ.

Ионосфера Земли неоднородная по пространству и нестационарная во времени. Пространственные неоднородности имеют масштабы от метров до десятков километров, которые меняются во времени (данный вопрос недостаточно изучен). До конца не ясна скорость перемещения мелкомасштабных составляющих, время их релаксации, то, как связаны размеры неоднородностей с высотой их расположения над поверхностью Земли. Неоднородности ионосферы приводят к флуктуации фазы принимаемого сигнала, как за счет колебаний угла вращения плоскости поляризации, так и за счет дисперсионных свойств ионосферы. Высоко-частотные флуктуации фазы представляют наиболее важную часть для получения выполнения синтеза изображения по азимуту.

Таким образом, видно, что для успешного применения РСА Р-диапазона необходимо проведение исследования ионосферы, хотя бы в отдельных районах радиолокационной съемки. При этом данный полигон помимо трехгранных уголкового отражателей необходимо оснастить аппаратурой, которая позволяла бы исполнять роль не только активного отражателя, но и выполнять специфические функции. Необходимо отметить, что функциональные особенности уголкового отражателя и активного калибратора для Р-диапазона разные. В частности, можно отметить, что для круговой поляризации при отражении от ровной поверхности меняется направление вращения плоскости поляризации на противоположное. Для обычного активного калибратора направление вращения плоскости поляризации не изменяется, т.е. при распространении ЭМИ на участке Земля – спутник фарадеевский угол поворота будет скомпенсирован. В этом случае РСА Р-диапазона и наземный сегмент функционируют как единый комплекс.

ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА

В описываемом эксперименте активный калибратор предназначен:

- а) для приема от передатчика РСА (Р) сигналов, формирования на их основе пачки отраженных сигналов, имитирующих отражение от точечной цели (изменение по амплитуде и по времени задержки);
- б) для изменения времени задержки от 1,2 до 6 длительности импульса (длительность ЛЧМ импульса 50 мкс);
- в) для обеспечения излучения нескольких импульсов в течение времени повторения зондирующего импульса;
- г) для обеспечения режима, когда поляризация сигнала на выходе активного калибратора та же, что и на входе, или повернута на задаваемый по программе угол.

При пролете над полигоном для каждого зондирующего импульса РСА V/Н поляризации определяется форма огибающей сигнала на поверхности Земли на V и Н поляризациях. В результате для каждого импульса на трассе спутник – Земля, а также на трассе Земля – спутник имеется возможность измерять его длительность, огибающую, закон частотного заполнения, значение фарадеевского угла поворота плоскости поляризации, изучать интервал времени, при котором соблюдается принцип взаимности.

Данные, полученные за время пролета МКС над данным устройством, позволяют определить интенсивность флуктуаций угла поворота плоскости поляризации, оценить флуктуации параметров сигнала, вызванные прохождением ЭМИ как на трассе спутник – Земля, так и на трассе Земля – спутник.

При отражении сигнала от поверхности Земли происходит изменение поворота плоскости поляризации отраженного сигнала. Возможность изменения плоскости поляризации на выходе активного калибратора дает возможность изучить влияние поворота на качество РЛИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ влияния ионосферы на работу космического РСА Р-диапазона показал необходимость создания специализированного наземного полигона, оборудованного не только трехгранными уголковыми отражателями, но и модифицированным транспондером с аппаратно-программным комплексом обработки информации, работающим совместно с оборудованием на МКС. Совместное согласованное функционирование РСА Р-диапазона с наземным сегментом позволяет проводить исследования, имеющие двойное значение: с одной стороны, изучать параметры ионосферы, а с другой – отрабатывать методику обработки голографических данных РСА для получения качественных РЛИ, необходимых для интерпретации отражательных свойств поверхности.

Список используемых источников

1. Влияние ионосферы Земли на работу РСА Р-диапазона: материалы доклада / А.А. Калинин, Б.Г. Кутуза, В.Ю. Манаков и др. // VI Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2020. – С. 329–333.
2. О разрешающей способности трансionoсферной ДЛС с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли в УКВ диапазоне волн / Ф.Б. Штейншлейгер, А.В. Дзенкевич, В.Ю. Манаков и др. // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т.42, №6. – С. 725–732.
3. Преодоление деструктивного влияния ионосферы на разрешающую способность космической РСА УКВ диапазона волн / Ф.Б. Штейншлейгер, А.В. Дзенкевич, В.Ю. Манаков и др. // Радиотехника. – 1998. – №10. – С. 101–104.
4. Quantitative characteristics of two-dimensional adaptive compensation for ionosphere destructive influence on VHF spaceborne SAR resolution / V. Shteinshleiger, A. Dzenkevich, V. Manakov et al. // EUSAR-98: Conference Proc. – 1998. – P. 157–161.
5. Early results from the DNA Wideband satellite experiment – Complex-signal scintillation / Fremam A. et al. // Radio Science. – 1978. – Vol.13, №1. – P. 167–187.
6. Impacts of ionospheric scintillation on the BIOMASS P-Band / N.C. Rogers, S. Quegan, J.S. Kim, K.P. Papathanassiou // IEEETrans. Geosci. Remote Sens. – Mar. 2014. – Vol. 52, №3. – P. 1856–1868.
7. Performance analysis of phase gradient autofocus for compensation ionospheric scintillation in BIOMASS P-Band SAR Data / Zhuo Li, Shaun Quegan, Jie Chen, Neil C. Rogers // IEEE Geoscience and Remote sensing. – 2015. – Uyin. – Vol. 12, №6.

Д.А. Коберник*,

кандидат технических наук;

В.А. Никольский*,

кандидат технических наук;

В.В. Руденко*,

кандидат физико-математических наук, доцент

* ФГКУ 12 ЦНИИ Министерства обороны Российской Федерации, г. Сергиев Посад.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ – ИОНОСФЕРА, ГЕНЕРИРУЕМОГО ЛИТОСФЕРНЫМИ ТОКАМИ

Для расчета параметров низкочастотного излучения в волноводе Земля – ионосфера разработана теоретическая модель, основанная на точном решении уравнений Максвелла через потенциалы Дебая в виде рядов по зональным гармоникам для слоисто неоднородной по высоте ионосферы и однородной – Земли, в которой находится источник излучения в виде горизонтального электрического диполя. В результате расчетов получены значения электромагнитных полей в волноводе для различных глубин расположения источника излучения под поверхностью земли и для широкого диапазона дискретных частот излучения. Показано, что оценка вариации Шумановских резонансов в волноводе позволяет использовать разработанный аппарат для мониторинга активных воздействий, обусловленных различными глобальными процессами в ионосфере и литосфере планеты.

Ключевые слова: волновод Земля – ионосфера, сейсмическая активность, Шумановские резонансы, уравнения Максвелла для электромагнитного поля, разложение в ряд сферических гармоник.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие в настоящее время подходы для описания распространения низкочастотного излучения используют либо алгоритмы, основанные на численном 3D решении уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области (FDTD) [1], либо точные решения в виде разложения в ряд по собственным функциям резонатора [2]. При использовании 3D FDTD расчетной схемы, задействующей значительные машинные ресурсы, получается решение, содержащее сразу некоторый диапазон частот, что не всегда удобно. В частности, это ограничивает возможности применения указанных подходов для исследования резонансных явлений, например в виде Шумановских резонансов. В то же время, основываясь на аналитическом решении уравнений Максвелла в сферической системе координат через потенциалы Дебая, для гармонических сигналов удается разделить переменные и представить решение в волноводе Земля – ионосфера и под поверхностью земли в виде ряда зональных гармоник [2]. Такой подход использовался для исследования распространения радиоволн СНЧ/КНЧ диапазона от источника, находящегося в ионосфере, или волноводе Земля – ионосфера с верхней границей, заданной в виде слоистой ионосферы с произвольным профилем диэлектрической проницаемости от высоты [3]. Аналогичный подход применялся в работе [4], однако ионосфера там рассматривалась как среда с независимыми от высоты параметрами.

В настоящей публикации приводится дальнейшее развитие разработанного подхода, позволяющее получить значения электромагнитных полей в волноводе, генерируемых расположенным под поверхностью слоистой земли источником, описываемым горизонтальным электрическим диполем, с учетом произвольного профиля зависимости свойств ионосферы от высоты для дневной и ночной моделей волновода.

НАХОЖДЕНИЕ КОМПОНЕНТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Задача рассматривается в следующей постановке. Земля моделируется сферой с привязанной к ее центру сферической системой координат (r, θ, φ) , как показано на рис. 1. При $r > r_c$ расположена ионосфера, при $r < r_a$ грунт, а между Землей и ионосферой ($r_a < r < r_c$) находится воздух, заполняющий волновод. Источник низкочастотного излучения моделируется горизонтальным электрическим диполем (ГЭД) с токовым моментом Idl , находящимся под поверхностью земли в точке $r=r_b$, $\theta=0$, $\varphi=0$ на глубине r_a-r_b . Стенки волновода образованы Землей, характеризующейся постоянной комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , и неоднородной по высоте ионосферой. Диэлектрическую проницаемость воздуха ϵ_0 можно считать постоянной и равной единице. В ионосфере зависимость $\epsilon(r)$ определяется через концентрацию заряженных частиц и эффективное число их соударений с нейтральными молекулами в зависимости от высоты, получаемыми из модели ионосферы IRI.

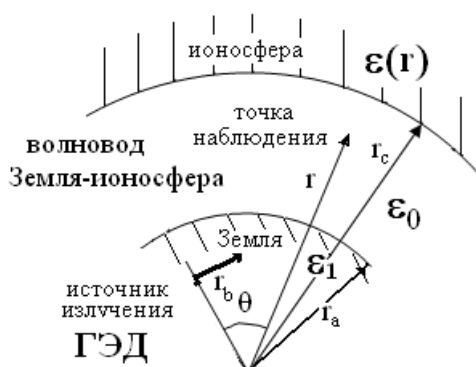


Рис. 1. Модель волновода Земля – ионосфера в сферической системе координат, привязанной к центру Земли с осью, проходящей через источник излучения в виде горизонтального электрического диполя

Решение для компонент электромагнитного поля в каждом из рассматриваемых слоев (волноводе, ионосфере и под поверхностью земли) выражается через потенциалы Дебая методом разделения переменных в виде ряда по собственным функциям сферического резонатора. В волноводе и под землей эти функции выражаются через линейную комбинацию функции Бесселя и Ханкеля, а в области ионосферы они являются решением уравнений второго порядка, аналогичных нестационарному уравнению Шредингера для квантового осциллятора [3]. Граничные условия, предполагающие непрерывность касательных составляющих поля на границах слоев, позволяют определить неизвестные постоянные, фигурирующие в уравнениях. Решение задачи осуществлялось через непосредственное точное суммирование рядов, основанное на алгоритмах, предложенных в работах [3, 4] и позволяющее получать значения полей в области частот до единиц килогерц.

Расчеты показывают, что общее количество слагаемых, необходимых для достижения заданной точности в указанном частотном диапазоне при суммировании ряда составляет $\sim 10^4$. При этом расчет величин, задающих свойства ионосферы, в виде импедансов и радиальных функций удобнее проводить отдельно, используя технологии параллельных вычислений. Полученные в виде массивов данных результаты расчета для различных состояний ионосферы представляют собой базу данных, позволяющих существенно сократить расчеты компонент электромагнитного поля.

Существенно, что применяемый подход позволяет, в отличие от численных методов, непосредственно получить решение в заданной точке в заданное время без расчета во всей

области, т.е. аналитическое решение не использует предысторию процесса при вычислениях. Эта особенность позволяет для целого класса задач получить решение за относительно небольшое время. В частности, можно исследовать частотную зависимость в заданной точке. Необходимо заметить, что в частотной зависимости для компонент поля будут наблюдаться максимумы в области частот от единиц до нескольких десятков герц, соответствующих первым Шумановским резонансам. Частоты этих резонансов могут быть получены как в результате расчетов, так и измерены экспериментально. Они имеют определенную вариацию, обусловленную изменениями свойств ионосферы или подстилающей поверхности, отвечающих за отражение излучения на верхней (волновод – ионосфера) и нижней (волновод – Земля) границе волновода. В результате измерение резонансных частот в низкочастотной области может быть использовано для мониторинга естественных или искусственно вызванных глобальных процессов в ионосфере и литосфере планеты, что и вызывает определенный интерес к их исследованию. Эти вариации отчетливо прослеживаются в области первых Шумановских резонансов, а затем с ростом частоты максимальные всплески амплитуды быстро убывают.

РАСЧЕТ КОМПОНЕНТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЛНОВОДЕ

С использованием разработанной методики был проведен ряд расчетов. В приведенных расчетах показаны результаты моделирования распространения низкочастотного излучения от токовой системы, находящейся в литосфере Земли на глубинах до 30 км. Расчеты проводились для дневной и ночной моделей ионосферы и единичного электрического токового момента для диапазона частот от долей герц до нескольких сот герц. Электрическое поле рассчитывалось в децибелах по отношению к сигналу в 1 В/м, а магнитное – в децибелах по отношению к сигналу в 1 А/м.

Доминирующими по величине компонентами электромагнитного поля для источника в виде ГЭД, находящегося под землей, как и в [5], являются компоненты E_r , H_θ и H_φ . Распространение остальных компонент поля плохо поддерживается волноводом, а их амплитуды меньше указанных, более чем на порядок.

Для дневной и ночной ионосферы на частотах порядка 100 Гц структура графиков зависимости амплитуд поля (компонент H_r , H_θ , H_φ) на поверхности Земли от расстояния для ГЭД, находящегося под землей на глубине 10 км, и угла $\varphi=\pi/4$ практически не меняется (рис. 2,а). Зато изменения амплитуды поля в зависимости от высоты подъема точки приема над Землей составляют несколько (порядка пяти) децибел (рис. 2,б). Расчеты приведены для компонент поля на расстоянии 2000 км от точки нахождения вертикали, проходящей через ГЭД, находящегося на глубине 10 км для частот излучения 1 Гц, 10 Гц, 100 Гц, и угла $\varphi=\pi/4$. Зависимость интенсивности принимаемого сигнала от высоты расположения точки приема в волноводе оказалась достаточно слабой для всех частот излучения, что говорит о возможности регистрировать сигнал практически на произвольной высоте.

Поскольку в области низких частот волновод Земля – ионосфера имеет резонансные частоты (Шумановские резонансы), то на этих частотах происходит некоторое усиление сигнала, генерируемого расположенным под поверхностью земли источником. Измеренные в спектре атмосферных шумов первые Шумановские резонансы примерно равны: $f_1=7,5$ Гц, $f_2=14,5$ Гц, $f_3=20,5$ Гц. График частотной зависимости амплитуд электромагнитных волн для диапазона частот от 1 Гц до 30 Гц для ночных и дневных условий излучения показан на рис. 3,а. Результаты представлены для компоненты поля E_r , возбужденной подземным ГЭД, расположенным на глубине 10 км и на расстоянии 1000 км по поверхности Земли от вертикали, проходящей через источник. Резонансы четко прослеживаются на графиках всех компонент электромагнитного поля. При этом для различных компонент поля и расстояния от источника амплитуды поля в зависимости от частоты могут как расти, так и убывать.

На рис. 3,б представлена частотная зависимость для компоненты поля E_r для тех же условий, при которых построены графики на рис. 3,а, однако для частотного диапазона до 200 Гц. Точка приема сигнала находилась на расстоянии 10 Мм, 15 Мм и 20 Мм от вертикали, проходящей через источник. Из анализа графиков непосредственно следует, что размах амплитуды колебаний наиболее значителен в области первых Шумановских резонансов и с ростом частоты и номера резонанса убывает. При этом изменение условий распространения в виде день – ночь приводит к сдвигу резонансов в диапазоне порядка 1 Гц. Из графика в ночных условиях значения этих резонансов равны соответственно: $f_1=7,9$ Гц, $f_2=14,7$ Гц, $f_3=20,7$ Гц, а в дневное время: $f_1=7,3$ Гц, $f_2=13,6$ Гц, $f_3=20,5$ Гц и примерно соответствуют измеренным экспериментально.

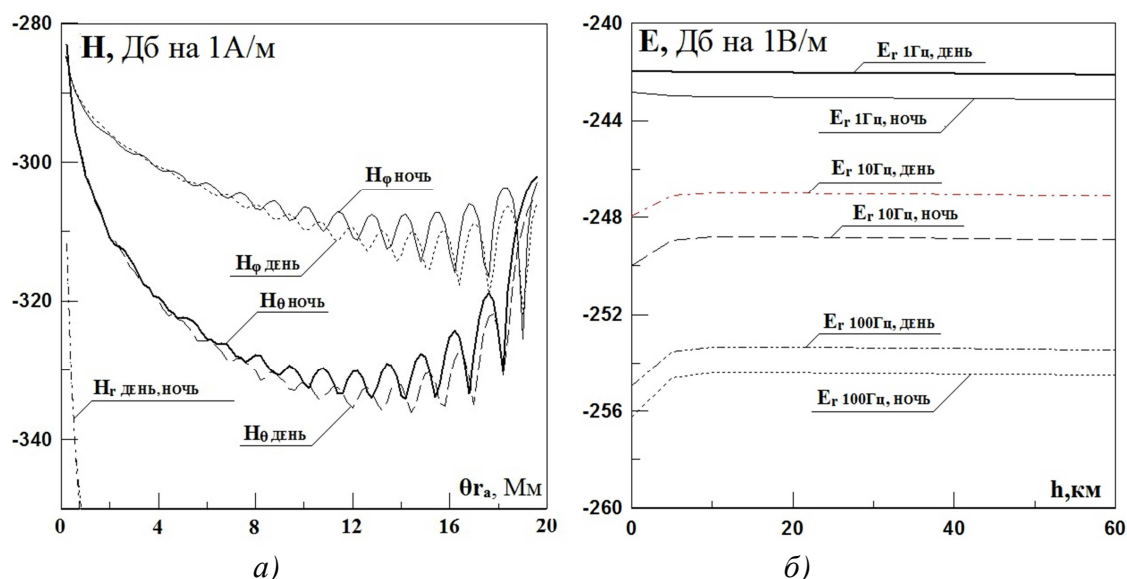


Рис. 2. Зависимость компонент магнитного поля H_r , H_θ , H_ϕ на поверхности Земли от расстояния θr_a до источника излучения в виде ГЭД для дневных и ночных условий на частоте 100 Гц (а); зависимость компоненты электрического поля E_r от высоты h регистрации сигнала в волноводе (б)

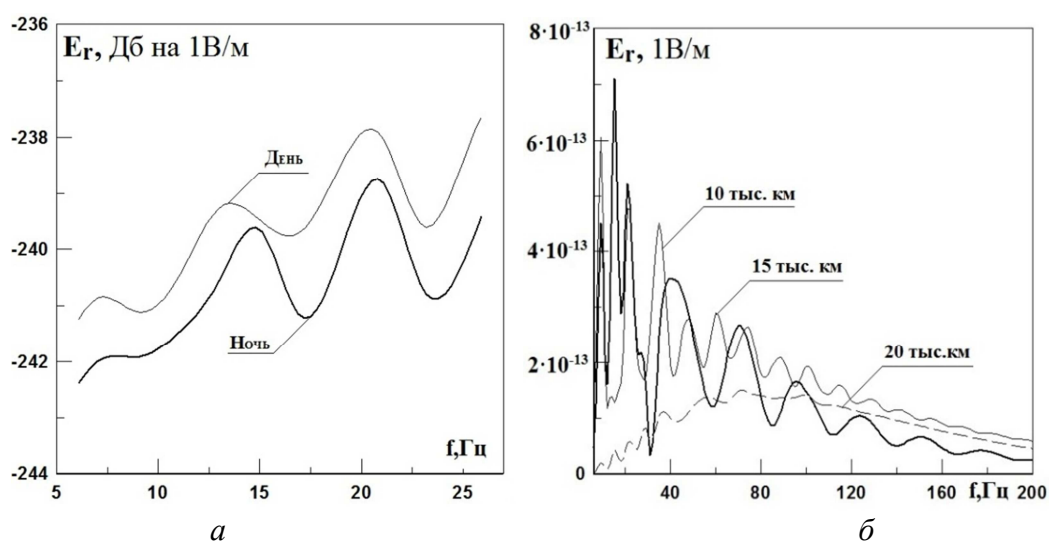


Рис. 3. Изменение амплитуды поля E_r в зависимости от частоты излучения в точке на поверхности Земли и на расстоянии 1000 км от вертикали, проходящей через находящийся на глубине 10 км источник (а); изменение амплитуды поля E_r в зависимости от частоты излучения в точке на поверхности Земли на расстояниях 10 Мм, 15 Мм и 20 Мм от вертикали, проходящей через находящийся на глубине 10 км источник (б)

Из приведенных результатов расчетов видно, что резонансные частоты Шумановских резонансов для ночной ионосферы несколько больше, чем для дневной. Оценки показывают, что частоты Шумановских резонансов зависят от высоты волновода, что подразумевает их вариацию при изменении условий день – ночь или при масштабной модификации ионосферы, обусловленной активными воздействиями, например ядерными взрывами. Изменения резонансных частот во время активных воздействий обусловлены дополнительной искусственной ионизацией ионосферы, приводящей к опусканию верхней границы волновода на величину, сопоставимую с глубиной, имеющей место при переходе терминатора день – ночь. Четко выраженные резонансные частоты наблюдаются в области до нескольких сот герц, а в области более высоких частот их амплитуда быстро убывает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан подход, позволяющий рассчитывать параметры низкочастотного излучения в волноводе Земля – ионосфера, инициированного литосферными токами, и получен ряд модельных расчетов электромагнитных полей, генерируемых находящимся под поверхностью земли низкочастотным источником в виде горизонтального электрического диполя. В рассматриваемом подходе используется модель, основанная на точном решении уравнений Максвелла в волноводе Земля – ионосфера через потенциалы Дебая, представляющем собой ряд по зональным гармоникам для слоисто неоднородной по высоте ионосферы и однослойной земли, в которой и находится источник излучения. Данная модель позволяет получить значения электромагнитных полей в волноводе на произвольных расстояниях от источника излучения для широкого диапазона дискретных частот излучения и различных глубин расположения источника под поверхностью земли. Точность расчета, достигнутая в данном подходе, позволяет исследовать частотные зависимости генерируемых литосферными токами сигналов. В области частот порядка единиц герц удастся получить зависимость от влияния различных природных и техногенных факторов частот первых Шумановских резонансов. Полученные результаты указывают на высокую эффективность созданного подхода для решения задач мониторинга активных воздействий, обусловленных различными глобальными процессами в ионосфере и литосфере планеты, в том числе сейсмической активностью как естественного, так и искусственного происхождения.

Список используемых источников

1. *Simpson J.J.* Global FDTD Maxwell's equations modeling of electromagnetic propagation from currents in the lithosphere // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2008. – Vol. 56, № 1. – P. 199–203.
2. *Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т.* Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. – М.: Наука, 1991. – 197 с.
3. *Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В.* Возмущение низкочастотных электромагнитных полей в волноводе Земля – ионосфера заглубленной под поверхностью земли сферической неоднородностью // *Успехи прикладной физики.* – 2016. – Т. 4, № 1. – С. 9–18.
4. Exact SLF/ELF Underground HED Field Strengths in Earth-Ionosphere Cavity and Schumann Resonance / *Y.X. Wang, R.H. Jin, J.P. Geng, X.L. Liang* // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2011. – Vol. 59, № 8. – P. 3031–3039.
5. *Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В.* Особенности распространения низкочастотного радиосигнала в глубину подстилающей поверхности // *Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды».* – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т. 2. – С. 89–94.

Р.В. Колесников*,

кандидат технических наук;

В.П. Сивоконь*****,

доктор технических наук, доцент

*ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ, г. Москва.

**Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка.

***КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТООРИЕНТИРОВАННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ

Неоднородности ионосферы оказывают существенное влияние на эффективность функционирования радиотехнических систем. Исследования, проведенные на полуострове Камчатка, показали, что для дециметровых радиолокаторов особо деструктивную роль играют магнитоориентированные неоднородности. С ними же связаны определенные ожидания в повышении эффективности радиотехнических систем путем активного воздействия на ионосферу. Одним из важных параметров таких неоднородностей являются их скоростные характеристики. При определении скорости неоднородностей в области воздействия используются различные подходы, например метод ракурсного рассеяния, который определяет скорость в целом, но не позволяет определить ее вертикальную и горизонтальные компоненты, направление ее перемещения. Разработанный нами подход позволяет решить эту проблему. В качестве примера приводятся результаты наблюдений за экспериментами EISCAT, проведенными в октябре 2019 года.

Ключевые слова: модификация ионосферы, магнитоориентированные неоднородности.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач, озвученных на V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», является «осуществление эффективного мониторинга состояния ионосферы для геофизического обеспечения систем загоризонтной радиолокации». Выполненные исследования [1] показали, что присутствие особого класса неоднородностей ионосферы, магнитоориентированных, оказывается актуальным не только для загоризонтной радиолокации. К этому типу неоднородностей не ослабевает интерес и при проведении активного воздействия на ионосферу [2]. Следовательно, исследование характеристик магнитоориентированных неоднородностей является актуальной задачей.

Для оценки параметров искусственных неоднородностей ионосферы используются различные методы, например пробной волны [3], ракурсного [4] и обратного рассеяния [5]. Для реализации этих методов необходимо сложное оборудование, недоступное большинству исследователей. Авторами предложен метод [6], в котором используются общедоступные программно-определяемые приемники SDR (Soft Defined Radio). Результаты наблюдений за экспериментами, проходившими в октябре 2019 года, показаны в настоящей работе.

МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сеть приемников SDR, расположенных в том числе в Европе, позволяет записывать электромагнитное излучение из области воздействия в пределах прямой видимости, что минимизирует влияние ионосферы на распространение этого излучения. Анализ распределения амплитуд рассеянного на неоднородностях ионосферы излучения, сформированного в результате активного воздействия на ионосферу, показал его бимодальный, а в ряде случаев и

полимодальный характер. При оценке пропускной способности коротковолнового канала связи, а нагрев ионосферы производится в этом диапазоне длин волн, как правило, принимают распределения Рэлея, Райса или Накагами [7]. Но они не являются бимодальными, т.е. наблюдаемые нами распределения являются аномальными по отношению к этим распределениям. Исходя из скорости наблюдаемых замираний (рис. 1), они относятся к быстрым.

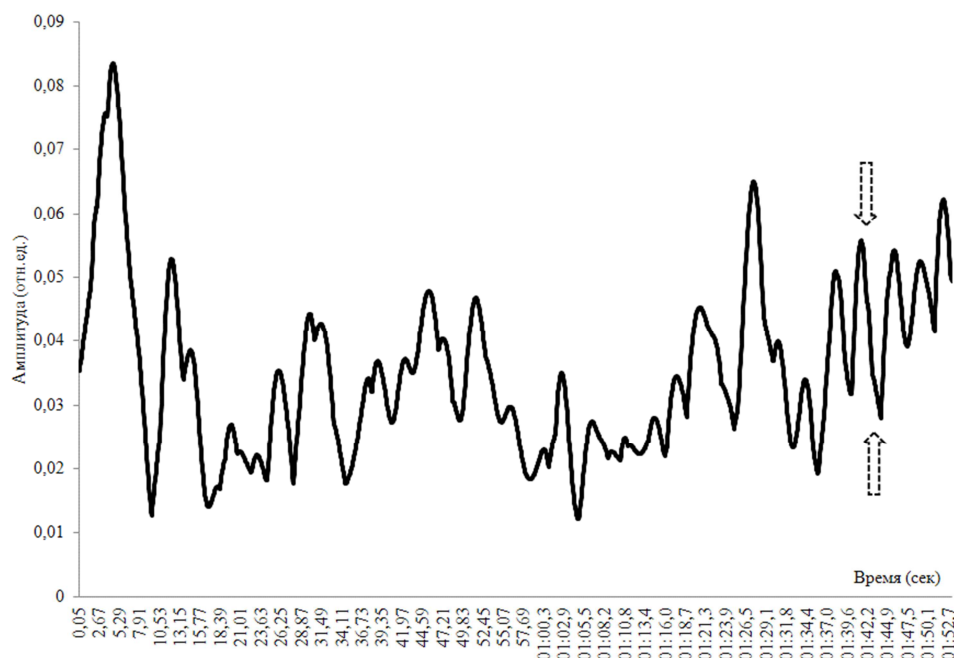


Рис. 1. Запись рассеянного сигнала 18 октября 2019 года 13:14 UT в п. Alta

Быстрые замирания подразделяются на интерференционные и поляризационные. Известно, что поляризационные замирания обусловлены магнитоионным расщеплением падающей на ионосферу волны и формированием в общем случае эллиптически поляризованного сигнала, поляризационные характеристики которого не совпадают с этими же характеристиками приемной антенны. Однако при активном воздействии на ионосферу при направлении в магнитный зенит используется излучение с круговой поляризацией, и вероятность проявления поляризационных замираний мала, поскольку в этом случае всегда найдется такое положение вектора напряженности электрического поля, которое будет совпадать с плоскостью поляризации приемной антенны [8, 9]. Интерференционные замирания, как правило, обусловлены разностью хода лучей, т.е. фазовыми соотношениями. В нашем случае необходимо учитывать и доплеровский сдвиг частоты, поскольку магнитоориентированные неоднородности перемещаются [1]. Тогда результирующее поле в общем случае можно представить как сумму:

$$E(t) = E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \dots + \xi(t),$$

где E_1, E_2 – амплитуды;

ω_1, ω_2 – частоты;

φ_1, φ_2 – фазы отдельных рассеянных компонент;

$\xi(t)$ – шумовая компонента.

Для случая, когда ω_1, ω_2 отличаются незначительно, а дисперсия шума мала, в работе [10] получено приближенное выражение для плотности вероятности огибающей процесса при двухлучевом распространении:

$$W(R) \cong \frac{R}{12\sigma^2} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (R^2 + E_1^2 + E_2^2) \right] \times \left\{ P I_0 \left[\frac{E_2}{\sigma^2} (R - E_1) \right] + \frac{1}{P} I_0 \left[\frac{E_2}{\sigma^2} (R + E_1) \right] + 2 \left[P I_0 \left(\frac{E_2}{\sigma^2} \sqrt{R^2 - R E_1 + E_1^2} \right) + \frac{1}{P} I_0 \left(\frac{E_2}{\sigma^2} \sqrt{R^2 + R E_1 + E_1^2} \right) \right] \right\},$$

где $P = \exp(-\frac{R E_1}{\sigma^2})$.

Выбирая параметры E_1 , E_2 и σ , можно получить бимодальное распределение, при этом корреляция компонент необязательна. Основным условием является отличие частот ω_1 и ω_2 . А поскольку это различие обусловлено доплеровским сдвигом частоты, а он не может быть значительным, по сравнению с частотой нагрева, то должны иметь место квазибиения или квазипериодические процессы. На рис. 1 признаки подобного процесса показаны стрелками. Кроме признаков биений в волновой форме нами обнаружено расщепление спектра (рис. 2). Это явление описывается в работах [10, 11]. При этом в работе [10] предполагается, что это явление обусловлено радиальным дрейфом магнитоориентированных неоднородностей.

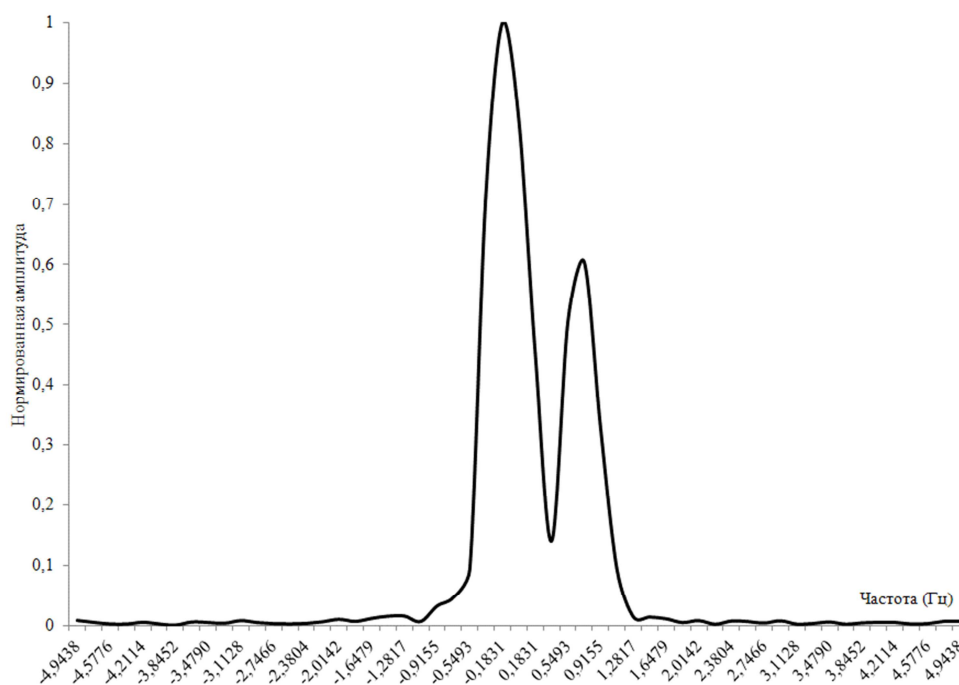


Рис. 2. Пример расщепления спектра в записи 18 октября 2019 года 13:14 UT в п. Alta

Наличие расщепления спектра – явление интересное, но при автоматической обработке записей это создает трудности в определении истинного значения доплеровского сдвига частоты. На данном этапе исследований, поскольку объем экспериментальных данных велик, а наши ресурсы ограничены, мы пошли на некоторое упрощение: программа определяет доплеровский сдвиг частоты для максимальной амплитуды.

На начальном этапе исследований при оценке скорости и направления перемещения неоднородностей мы использовали десятисекундное усреднение, что для описанных выше параметров неоднородностей, вероятно, не оправдано. Поэтому при обработке данных октября 2019 года мы использовали иной подход. Программно задавалось максимальное значение FFT и одновременно устанавливалось максимальное разрешение по времени.

Исходя из полученных данных строилось распределение доплеровских сдвигов частоты и по ним вычислялось распределение скоростей. Поскольку на одном графике разместить данные по всему циклу нагрева не представляется возможным, мы разбили цикл на периоды повышения и понижения мощности. Результаты для пункта Alta представлены на рис. 3 и 4.

Маркеры показывают дискретные значения скоростей, при этом линии, соединяющие маркеры, применены для того, чтобы можно было проще отследить изменение скорости на этапе нагрева.

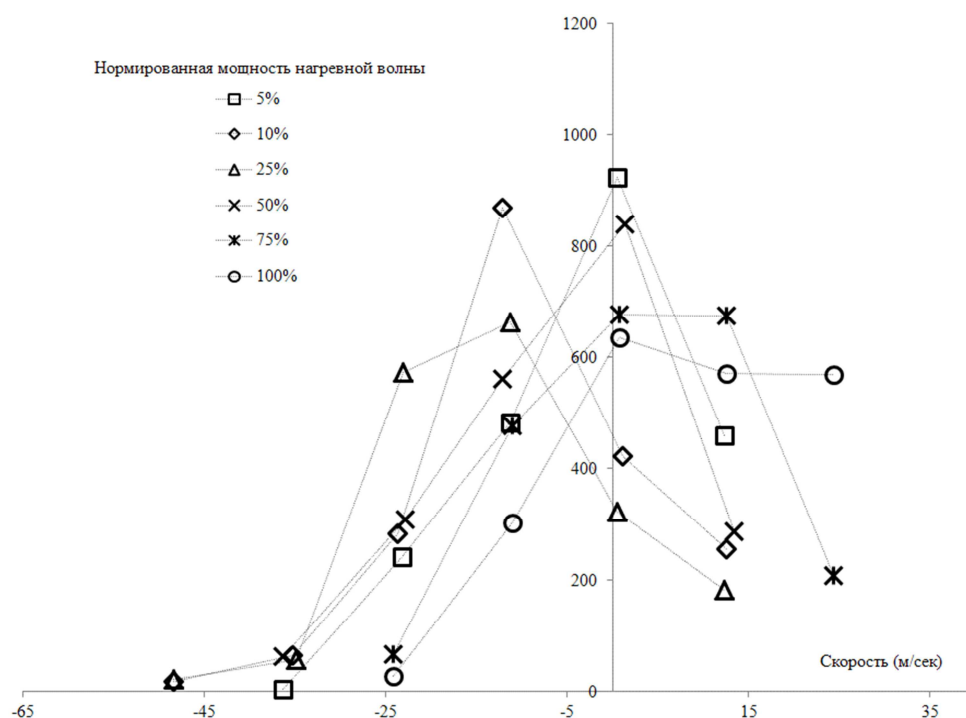


Рис. 3. Распределение скоростей при повышении мощности воздействия

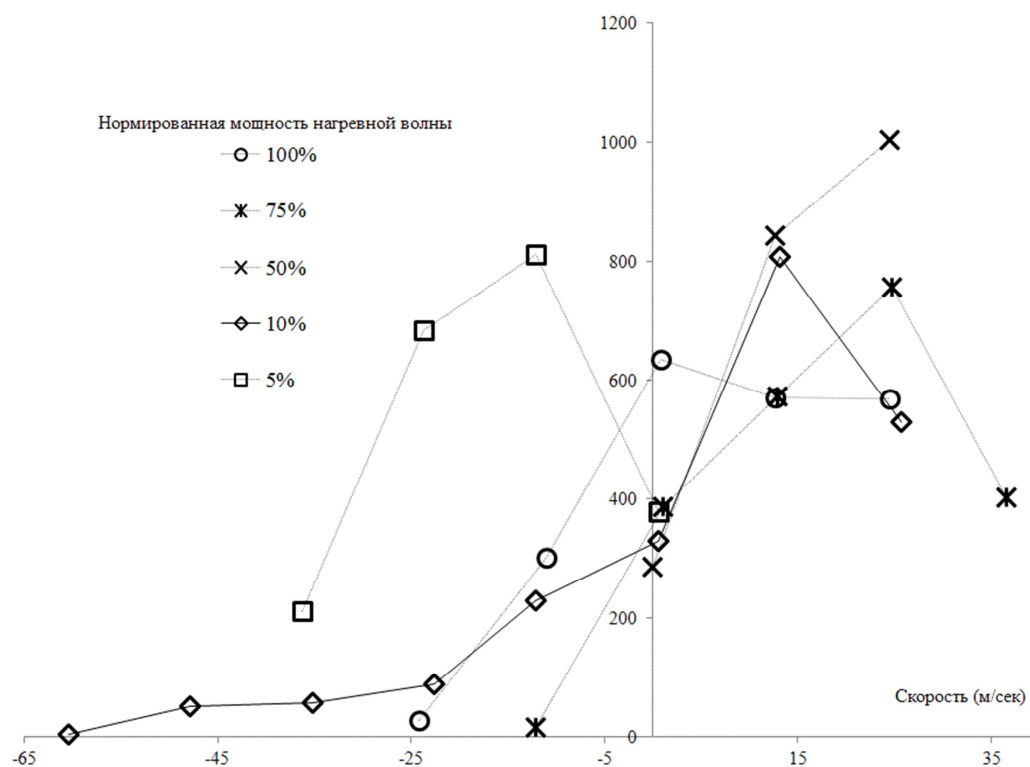


Рис. 4. Распределение скоростей при понижении мощности воздействия

Из графиков видно, что при увеличении мощности воздействия происходит изменение величины и знака скорости. При минимальном воздействии неоднородности двигались от наблюдателя. По мере роста мощности они стали двигаться в противоположном направлении. При уменьшении мощности воздействия можно было ожидать обратной картины, что в целом и произошло, однако процесс развивался с замедлением, а это может свидетельствовать об инерционных процессах в плазме ионосферы.

Поскольку нами используется многопозиционное диагностирование модификации ионосферы, т.е. наблюдение области происходит под разными углами в вертикальной и горизонтальной плоскостях, это позволяет определить компоненты скорости неоднородностей и направления преимущественного их перемещения (рис. 5).

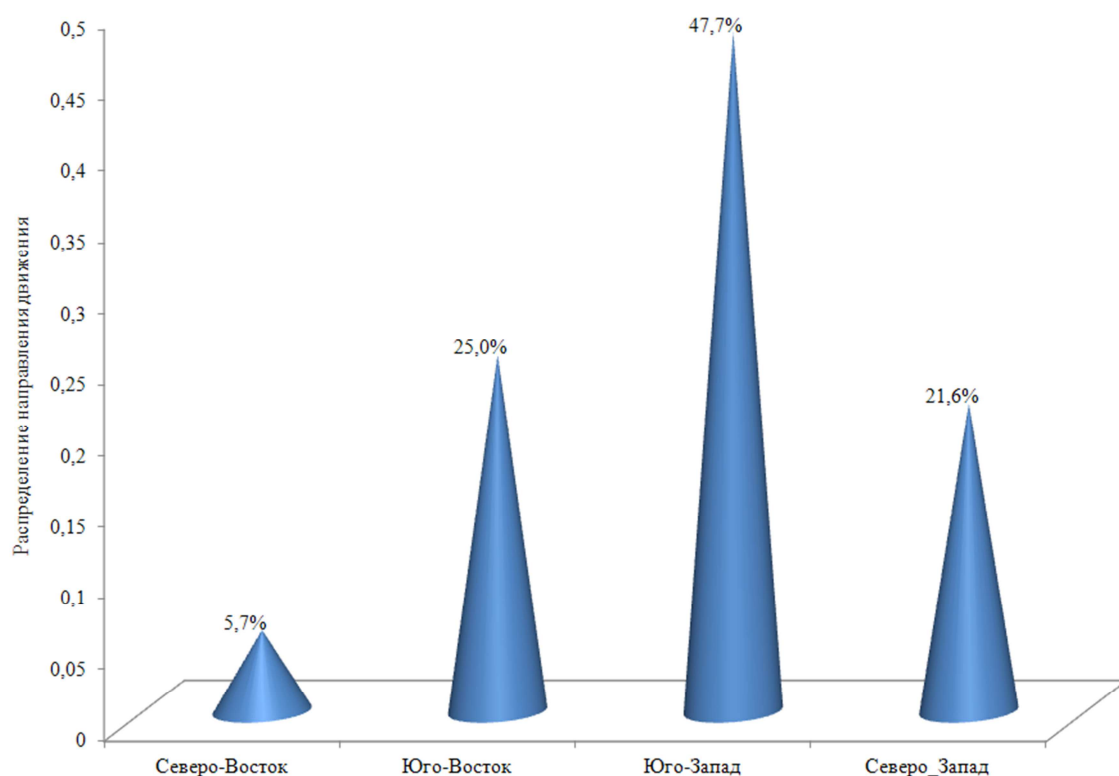


Рис. 5. Распределение направлений движения неоднородностей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлена возможность исследования скоростей и направления движения магнитоориентированных неоднородностей ионосферы с использованием технологии SDR.

Наблюдения показали зависимость скорости и направления движения от мощности нагревной волны.

Движение, обусловленное активным воздействием на ионосферу, происходит преимущественно на юг.

Список используемых источников

1. Сивоконь В.П. Обратное рассеяние декаметровых волн на магнитоориентированных неоднородностях ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2017. – Т. 57, №2. – С. 1–10.

2. Artificial Small-scale Field-aligned Irregularities in the High Latitude Ionospheric F-region / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, A.S. Kalishin, T.K. Yeoman // AGU Fall Meeting 10–14 December, 2018. – Washington, DC, USA.
3. О зависимости аномального ослабления пробных волн от частоты при воздействии мощным радиоизлучением на ионосферу / С.М. Грач, Г.П. Комраков, М.М. Шварц, М.А. Юрищев // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1998. – Т. 41, № 8. – С. 966–977.
4. Явления, инициированные модификацией ионосферы мощными КВ-радиоволнами на различных широтах / Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, В.А. Корниенко и др. // Солнечно-земная физика. – 2008. – Вып. 12, т. 2. – С. 206–209.
5. Исследование мелкомасштабной турбулентности в слое F ионосферы методом обратного рассеяния коротких радиоволн / Н.А. Митяков, В.А. Алимов, В.А. Зиничев и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2010. – Т. 53, № 5–6. – С. 329–337.
6. Сивоконь В.П., Колесников Р.В., Демичев И.В. Метод оценки параметров искусственных магнитоориентированных неоднородностей ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. – Т. 24, № 8. – С. 23–28.
7. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. – М: Радио и связь, 1982. – 304 с.
8. Сивоконь В.П. Поляризация коротких волн в ионосферном канале связи // Электро-связь. – 2007. – № 7. – С. 55–58.
9. Сивоконь В.П., Дружин Г.И. Геомагнитный фактор Dst-вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46, № 4. – С. 521–524.
10. Радиальный дрейф стимулированных мелкомасштабных неоднородностей перпендикулярно геомагнитному полю / А.В. Колосков, В.С. Белей, Т.Б. Лейзер, Ю.М. Ямпольский // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, №3. – С. 247–260.
11. Расщепление доплеровского смещения частоты ракурсно рассеянных сигналов в период проведения экспериментов на стенде «Сура» / Т.Д. Борисова, Н.Ф. Благовещенская, В.А. Корниенко и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 49, №4. – С. 535–544.

М.В. Коломин*;
Н.Г. Котонаева*,
доктор физико-математических наук;
В.В. Михайлов*,
кандидат физико-математических наук

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО ОПЕРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОДНОЙ СТАНЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Исследована возможность коррекции климатических моделей ионосферы по данным одного наблюдательного пункта, оснащенного ионозондом вертикального радиозондирования, с целью мониторинга плазменной оболочки Земли в реальном времени в окрестности этого средства измерения. Для исследований использовались модели SIMP-STANDARD и IRI. В качестве критериев эффективности коррекции климатических моделей ионосферы взяты вероятности того, что относительные отклонения скорректированных моделей будут менее 10%.

Определены размеры областей вокруг каждого ионозонда государственной ионосферной сети, в которых возможно повышение качества ионосферного мониторинга путем коррекции климатической модели ионосферы по данным этого конкретного ионозонда.

Ключевые слова: коррекция ионосферных моделей, распространение радиоволн, вертикальное зондирование, модель IRI, модель SIMP-STANDARD.

ВВЕДЕНИЕ

Использование климатических моделей среды для оперативного мониторинга всегда сопряжено с задачей ассимиляции в модель информации с наблюдательной сети с целью экстраполяции данных на неосвещенную территорию. Это распространяется и на мониторинг ионосферы. Существующие медианные модели, такие как IRI [1], SIMP-STANDARD [2] описывают среднеемесячное климатическое состояние, возможность их использования в реальной диагностике среды является предметом исследования многих авторов.

Одним из способов проведения коррекции ионосферных моделей является коррекция по данным наблюдений одного конкретного средства наблюдений, такого как ионозонд вертикального радиозондирования.

Основной целью исследования стал вопрос определения областей эффективного использования одного ионозонда вертикального зондирования для коррекции климатической модели ионосферы. Для решения указанной задачи рассматривались две модели: широко известная международная модель IRI в версии IRI-2012 [1] и эмпирическая медианная модель SIMP_STANDARD [2, 3], разработанная в Институте прикладной геофизики имени Е.К. Фёдорова (ФГБУ «ИПГ»). Модель охватывает ионосферные области D, E и F в диапазоне высот от 65 до 1000 км.

МЕТОДЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Проверка эффективности коррекции ионосферных моделей по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования государственной наблюдательной сети проводилась следующим образом. Данные о критической частоте слоя F2 ионосферы, полученные на стан-

ции, которую будем называть станцией-донором, ассимилировались в модель одним из указанных ниже способов. С помощью скорректированной модели рассчитывались значения $foF2$ в точках расположения контрольных ионозондов, называемых станциями-реципиентами. Данные ионозондов на станциях-реципиентах использовались исключительно для сравнения результатов экстраполяции. При проведении статистического анализа каждый ионосферный наблюдательный пункт объявлялся по очереди станцией-донором, а остальные при этом становились станциями-реципиентами.

Для коррекции по данным одного ионозонда были применены два метода. Первый из них связан с подбором эффективного значения входного геофизического индекса глобальной ионосферной модели.

Методика коррекции моделей состоит в нахождении такого эффективного значения геофизического индекса, при котором

$$foF2_{obs}(D) - foF2_{mod}(D) = 0, \quad (1)$$

где $foF2_{obs}(D)$ – наблюдаемые часовые значения критической частоты слоя F2 на станции-доноре;

$foF2_{mod}(D)$ – критическая частота в точке расположения станции-донора, рассчитанная с помощью модели при специально подобранном значении геофизического индекса.

При проведении исследования выяснено, что данный метод эффективен для модели IRI, но неприменим для модели SIMP-STANDARD.

Вторым методом коррекции, названным корреляционным методом коррекции, который был использован в работе, стал метод, основанный на пропорциональном изменении критической частоты слоя F2 на станции-реципиенте по формуле

$$foF2_{korr}(R) = \frac{foF2_{obs}(D)}{foF2_{mod}(D)} \cdot foF2_{mod}(R), \quad (2)$$

где $foF2_{mod}(D)$, $foF2_{mod}(R)$ – модельные значения $foF2$ на станции-доноре и реципиенте соответственно, рассчитанные при наблюдаемых значениях геомагнитных индексов.

Статистические критерии, определяющие эффективность проведения коррекции, определяются задачами, для решения которых предназначены те или иные модели. Они должны отражать характеристики ошибки коррекции:

$$\Delta foF2 = foF2_{korr}(R) - foF2_{obs}(R),$$

где аргумент R означает, что наблюдаемое (obs) и скорректированное ($korr$) значения критической частоты $foF2$ получены на одной станции-реципиенте и в один момент времени; а относительная ошибка коррекции определяется выражением

$$\delta foF2 = \frac{\Delta foF2}{foF2_{obs}(R)}.$$

В предположении, что для удовлетворительной работы технических средств допустима некоторая малая ошибка в определении параметра критической частоты ионосферы, в качестве критериев эффективности проведения коррекции взяты вероятности того, что относительная ошибка коррекции будет менее этого значения.

Для примера рассмотрим в качестве такой допустимой ошибки величину 10% относительной ошибки:

$$P_{10} = P(|\delta foF2| \leq 10\%). \quad (3)$$

Критерием, определяющим возможность проведения коррекции, явилась разница вероятностей ошибки меньшей 10%, рассчитанных по скорректированной ионосферной модели и по ионосферной модели без коррекции:

$$\Delta_{10} = P_{10 \text{ korr}} - P_{10 \text{ mod}}. \quad (4)$$

Выборка для определения статистических критериев эффективности (3), (4) бралась по всем часовым значениям 2017–2018 гг. в те моменты, когда на станциях-донорах и реципиентах одновременно были получены часовые значения $foF2$, используемые для сравнения и коррекции. Отметим, что объем выборки варьировался от 16000 значений на среднеширотных станциях до 8000 на северных станциях. Это обусловлено периодами F-рассеяния и ионосферного поглощения, в большей степени характерными для северных регионов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Проверка на возможность проведения коррекции проводилась для всех пар ионосферных наблюдательных пунктов, оснащенных ионозондами вертикального радиозондирования, находящимися в ведомстве Росгидромета. Частично результаты статистического анализа приведены в табл. 1. Каждой станции в первом столбце присвоены условные номера. В таблице указаны объемы выборки, по которым рассчитывались значения P_{10} . В табл. 1 представлены значения параметра P_{10} для станций Сибири, включая северные станции.

Таблица 1

Вероятности того, что относительная ошибка определения критической частоты слоя F2 будет меньше 10% для коррекции по станциям Сибири. Объемы используемых выборок

Станция-реципиент	Станция-донор	IRI					SIMP-STANDARD		
		Объем выборки без коррекции	IRI без коррекции, %	IRI при корреляционной коррекции, %	IRI с коррекцией по IG, %	Объем выборки с корр. по IG	SIMP-STANDARD без коррекции, %	SIMP-STANDARD при корреляционной коррекции, %	Объем выборки
6. Новосибирск	7	12581	61	63,5	66,1	11569	65,8	66,9	12111
	8	8695	66,8	55,3	58,6	8572	72,1	64,4	8695
	9	8281	67,2	52,2	55,3	7961	72,4	61,9	8281
	10	8406	66,5	46,8	50	7854	71,3	57,3	8406
7. Подкаменная Тунгуска	6	12581	55,6	63	60,1	12278	62,8	66,8	12111
	8	8254	63,5	64,6	65,6	8134	67,6	70,7	8254
	9	7760	64,9	58,7	60,9	7538	68,5	66,4	7760
	10	7687	63,9	55,5	57,8	7277	67,9	63,6	7687
8. Салехард	6	9165	59,6	54,8	52,7	8488	65,6	64,4	8695
	7	8724	59,9	64,3	63,3	8061	66,5	71	8254
	9	7026	62,7	81,3	82,6	6797	69,6	81,8	7026
	10	6712	62,5	67,9	70,2	6355	69,6	71,5	6712
9. Амдерма	6	8751	61	51,5	50	7697	66	62,2	8281
	7	8230	60,8	58,3	58,5	7563	66,5	67,1	7760
	8	7026	63,1	81,1	81,8	6930	68,9	82,1	7026
	10	6692	64,4	74,2	76,3	6329	70,4	76,2	6692
10. Диксон	6	8876	55,6	46,2	45,3	8380	62,4	57,7	8406
	7	8157	57,3	54,5	55,3	7582	63,2	63,8	7687
	8	6712	58,8	67,5	69,3	6657	65,3	71,2	6712
	9	6692	60,3	74,1	75,8	6551	66,4	75,5	6692

В данной публикации стояла задача выяснить размеры областей, в которых использование одного ионозонда вертикального радиозондирования позволило бы повысить эффективность применения климатических моделей для оперативной диагностики среды.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при использовании моделей ионосферы без коррекции в северном и европейском регионе только 50–60% значений $foF2$ будут иметь ошибку менее 10%. На Дальнем Востоке эта величина составит 40–50%. Коррекция модели по одному ионозонду при благоприятном расположении ионозонда-донора может повысить эти показатели на 10–15%.

Используя весь массив попарной проверки возможности коррекции, можно нарисовать выявленные области эффективности использования данных одного ионозонда. Будем считать, что коррекция эффективна, если параметр P_{10} увеличился хотя бы на 5%.

На рис. 1 показан алгоритм построения областей эффективности коррекции на примере станции Амдерма. Применялся следующий алгоритм построения. При использовании данных станции Амдерма в ходе определения критической частоты слоя F2 в точке, где расположена станция Диксон, получен выигрыш в параметре P_{10} на 15,5%. Поэтому граница области эффективности коррекции расположена дальше Диксона. Аналогичные рассуждения проведены для точек расположения станций Салехард, где выигрыш составил 19,9%, и точки расположения станции Ловозеро – 12,7%. Выигрыш на станции Горьковская составил только 1%, поэтому на линии Горьковская – Амдерма граница области эффективности находится между ними и рассчитывается из условия обратной пропорциональности. В случае, если в некотором направлении эффективность коррекции в точке станции-реципиента по данной станции-донора не установлена, область эффективности ограничивалась 300 км от станции-донора.



Рис. 1. Пример построения области эффективности проведения коррекции по данным станции Амдерма

На рис. 2, построенном на основе всего массива попарной проверки возможности коррекции, также включающем данные табл. 1, указаны области, в которых эффективность коррекции, оцененная по параметру P_{10} , составит 5% и более. Рисунок построен по алгоритму, описанному выше.

Из рисунка следует, что области, в которых коррекция климатических моделей по данным одного ионозонда возможна, составляют в среднем менее 1500 км по долготе и менее 800 км по широте. Отметим также, что в большинстве случаев выполняется условие, по которому коррекцию лучше осуществлять по станции, находящейся южнее, чем в обратном направлении.

Существующая сеть ионозондов государственной наблюдательной сети в составе станций, указанных на рис. 2, является необходимой, но недостаточной. Необходимо объединение наблюдательных ресурсов различных ведомств, в частности ионозондов Российской академии наук – обсерватории Арктики на Урале и ионозонда ИСЗФО РАН в Иркутске.



Рис. 2. Области эффективности проведения коррекции модели IRI по данным станций государственной наблюдательной сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные статистические исследования по анализу возможности проведения коррекции климатических ионосферных моделей по данным одного ионозонда вертикального радиозондирования показали, что современные модели, на примере моделей IRI и SIMP, построенные на большом экспериментальном материале, возможно корректировать по данным одного измерения в области не более 1500 км по долготе и не более 800 км по широте. В этой области число случаев, когда относительная ошибка определения критической частоты слоя F2 будет меньше 10%, возрастет более чем на 5%. Зоны, в которых использование данных ближайшего ионозонда повысит эффективность использования климатических моделей, покрывают почти всю северную часть и европейский регион РФ. На Урале, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке эта сеть либо минимальна, либо недостаточна. Более широкому покрытию территории РФ зонами, в которых эффективна коррекция модели, может способствовать объединение наблюдательных ресурсов различных ведомств, в частности ионозондов Российской Академии наук – обсерватории Арктики на Урале и ионозонда ИСЗФО РАН в Иркутске.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-05-80023.

Список используемых источников

1. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik et al. // Space Weather. – 2017. – Vol. 1. – P. 418–429. –Doi:10.1002/2016SW001593.
2. Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ 25645.146) / В.В. Михайлов, К.Г. Цыбуля, М.Г. Деминов и др. // Материалы XXV всероссийской конференции по распространению радиоволн. – М., 2016. – С. 51–57.
3. Системный мониторинг ионосферы: сб. науч. трудов / под ред. Н.Г. Котонаевой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 416 с.

П.В. Савочкин,
кандидат технических наук, доцент
ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА АПЕРТУРЕ ПРИЕМНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С УЧЕТОМ ВОЗМУЩЕНИЙ ТРАССЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

Представлены результаты моделирования амплитудно-фазового распределения в месте расположения приемной антенной решетки радиолокационной станции коротковолнового диапазона с учетом трассы распространения зондирующего сигнала. Проведен анализ изменения амплитудно-фазового распределения с учетом ширины диаграммы направленности передающей антенны.

Ключевые слова: радиолокационная станция, амплитудно-фазовое распределение, антенная решетка, трасса распространения.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей радиолокационных станций (РЛС) вне зависимости от диапазона волн, в котором они работают, является определение дальности до объекта и направления на него с учетом требуемой угловой разрешающей способности. Точность определения дальности зависит от параметров зондирующего сигнала, а угловая разрешающая способность – от характеристик приемной антенны, а именно, от ее диаграммы направленности (ДН), где формирование диаграммы направленности можно описать как процесс суммирования амплитуды и фазы сигналов, пришедших на отдельные элементы антенной решетки (АР).

С учетом специфики работы радиолокационных станций коротковолнового (КВ) диапазона линейные размеры приемных антенных решеток (АР) могут варьироваться от сотен метров до трех километров и содержать до 500 антенных элементов [1, 2]. Размеры АР с одной стороны ограничиваются необходимым угловым разрешением, а с другой – рабочими параметрами, которые подразумевают под собой потерю пространственной когерентности, обусловленной незеркальным отражением сигнала от ионосферы. Максимальное угловое разрешение такой антенны определяется критерием Релея при условии формирования на ее элементах неискаженного амплитудно-фазового распределения (АФР). Искажения в АФР, вызванные неравномерностью волнового фронта, падающего на апертуру АР, приводят к ошибкам в определении углового положения лоцируемого объекта за счет искажения ДН, выраженной в отклонении ее максимума от положения фазирования, расширении основного лепестка, увеличении уровня боковых лепестков. Кроме ошибок в определении угловых координат снижается и энергетический потенциал РЛС, приводящий к уменьшению дальности обнаружения объектов. Эти искажения обусловлены пространственно-неоднородной структурой трассы распространения радиоволн, связанных с ее диспергирующими свойствами, а также с дифракцией радиосигнала при отражении его от земной поверхности, имеющей определенный рельеф, отличный от плоской отражающей поверхности. Для учета влияния искажений волнового фронта на ДН требуется создание модели формирования АФР на апертуре АР.

Существенное влияние среды распространения в КВ диапазоне вызывает трудности в определении волновых процессов, воздействующих на антенну. Решение уравнений Максвелла для анализа распространения радиоволн в КВ диапазоне, ввиду невозможности учесть в полной мере параметры среды распространения и граничные условия, найти в классической постанов-

ке невозможно. На практике при расчете полей в данном диапазоне используют приближенные методы. Наибольшее распространение получил метод геометрической оптики или лучевое приближение. Описания распространения КВ-радиоволн в рамках приближения геометрической оптики были рассмотрены еще в середине прошлого века [3]. Численное моделирование распространения радиоволн данного диапазона решено в настоящее время различными методами, которые в своей основе используют лучевое представление [4–9].

Целью настоящей публикации является описание модели формирования АФР на апертуре приемной антенной решетки с учетом возмущений трассы распространения в радиолокационных станциях коротковолнового диапазона.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения АФР на апертуре необходимо построить трассы распространения КВ радиоволн от точки отражения до элементов АР с необходимой точностью. Моделирование было основано на решении уравнения эйконала методом характеристик. В сферической системе координат уравнения лучей имеют вид [3, 10]:

$$\begin{aligned}
 \frac{dr}{d\tau} &= \frac{\partial H}{\partial k_r}, \\
 \frac{d\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial k_\theta}, \\
 \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial H}{\partial k_\varphi}, \\
 \frac{dt}{d\tau} &= -\frac{\partial H}{\partial \omega} \\
 \frac{dk_r}{d\tau} &= -\frac{\partial H}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{d\tau} + k_\varphi \sin \theta \frac{d\varphi}{d\tau}, \\
 \frac{dk_\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} \left[-\frac{\partial H}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{d\tau} + k_\varphi \cos \theta \frac{d\varphi}{d\tau} \right], \\
 \frac{dk_\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \sin \theta} \left[-\frac{\partial H}{\partial \varphi} - k_\varphi \frac{dr}{d\tau} - k_\theta \cos \theta \frac{d\theta}{d\tau} \right], \\
 \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{\partial H}{\partial t},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где r, θ, φ – сферические координаты;

k_r, k_θ, k_φ – компоненты волнового вектора, $(k_r^2 + k_\theta^2 + k_\varphi^2 = \frac{\omega^2}{c^2})$;

c – скорость света;

τ – групповой путь;

ω – угловая частота;

t – время;

H – гамильтониан, $H = \text{Re} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{c^2}{\omega^2} (k_r^2 + k_\theta^2 + k_\varphi^2) - n^2 \right) \right]$, где n – коэффициент преломления.

Зависимость показателя преломления от концентрации электронов в среде распространения, индукции магнитного поля Земли и частоты соударения нейтральных частиц определяется известным выражением Эпплтона – Хартри [10]:

$$n^2 = 1 - 2X \frac{1 - jZ - X}{2(1 - jZ)(1 - jZ - X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4Y_L^2(1 - jZ - X)^2}}, \quad (2)$$

$$X = \frac{f_N^2}{f^2}, Y = \frac{f_H}{f}, Z = \frac{\nu}{2\pi f}, Y_T = Y \sin \psi, Y_L = Y \cos \psi.$$

Здесь f_N – плазменная частота;
 f_H – гиромагнитная частота электронов;
 f – частота работы РЛС;
 ν – эффективное число столкновений электронов с нейтральным газом;
 ψ – угол между направлением распространения волны и внешним магнитным полем.

Численное интегрирование системы уравнений (1) с соответствующими начальными условиями позволяет построить семейство лучевых траекторий и вычислить групповой путь для каждого луча. Так как лучи в каждой точке нормальны к соответствующей волновой поверхности, а волновые поверхности являются поверхностями постоянного эйконала, фазовое распределение на апертуре определяется суперпозицией волновых поверхностей всего семейства лучей, падающих в окрестности расположения АР:

$$\phi(\theta, \varphi) = \int_S \phi_i dS = \int_S \int_{\tau} k_i d\tau dS, \quad (3)$$

где S – поверхность в окрестностях расположения АР;
 ϕ_i – фаза i -го луча на апертуре АР;
 $d\tau$ – элементарный отрезок по траектории луча, на котором выполняются условия распространения плоского волнового фронта, выбираемый в соответствии с требуемой точностью определения фазы сигнала на элементах решетки.

Затухание амплитуды волны вдоль траектории луча, при условии известного профиля электронной концентрации и частоты соударений, вычисляется на основе уравнений Эпплтона – Хартри. В квазипродольном приближении коэффициент поглощения можно вычислить по формуле [11]

$$\Gamma = \int_{\tau} \frac{N_e \nu}{\nu + (f \pm f_H \cos \psi)^2} d\tau, \quad (4)$$

где N_e – электронная концентрация. Знакам «+» и «-» соответствуют обыкновенная и необыкновенная волна.

Частота соударений электронов ν , как и электронная концентрация N_e , зависят от высоты. Частота электрон-ионных соударений определяется выражением [12]

$$\nu = \nu_e + \nu_{en},$$

где ν_e – частота соударений электронов с ионами;

ν_{en} – частота соударений электронов с нейтральными частицами.

Частота соударений электронов с нейтральными частицами ν_{en} зависит от концентрации молекулярного азота (N_2), молекулярного и атомарного кислорода (O_2 и O).

Таким образом, АФР на апертуре АР является функцией от двух параметров:

$$\dot{E}(\theta, \varphi) = f(\phi(\theta, \varphi), \Gamma). \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки АФР на апертуре АР была разработана модель, позволяющая вычислять фазу и амплитуду сигнала в месте расположения приемной АР на основе построения семейства лучевых траекторий с заданным шагом по угловым координатам в пределах требуемого уровня основного лепестка ДН. Траектория лучей строится от передающей антенны до поверхности земли и с учетом диффузного отражения – от поверхности земли до приемной антенны. Данная модель была разработана на основе работы R.M. Jones и J.J. Stephenson [10]. При построении траектории лучей учитывалось магнитное поле Земли, вызывающее боковые отклонения, и тем самым увеличивающее набег фазы, а также учитывалось затухание сигнала вдоль трассы распространения.

Интерфейс программы представлен на рис. 1. В левой части задаются исходные данные для моделирования, а в правой – отображаются результаты. Она позволяет использовать различные модели ионосферы, магнитного поля земли, задавать место расположения передающей и приемной антенн РЛС.

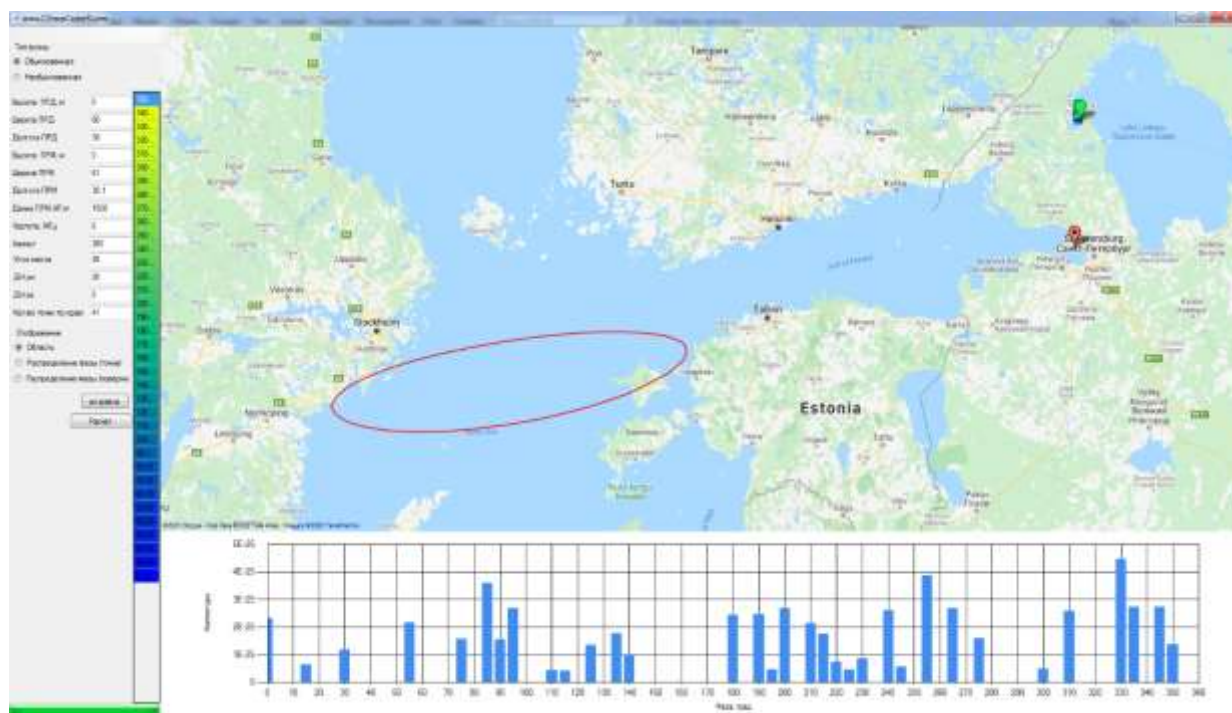


Рис. 1. Интерфейс программы моделирования работы радиолокационной станции коротковолнового диапазона волн

В точке приема цветами обозначено распределение фаз, а в нижней части – амплитудно-фазовое распределение в месте расположения АР. Овалом обозначена область засветки для соответствующих параметров ДН передающей антенны.

На рис. 2 изображено АФР в месте расположения приемной АР. Из анализа рисунка следует, что за счет большой зоны отражения от поверхности Земли на апертуре присутствуют составляющие волнового фронта с фазами от 0° до 360° . При наличии объекта в зоне обзора РЛС его обнаружение, без дополнительных радиолокационных признаков, как например доплеровское смещение частоты, невозможно.

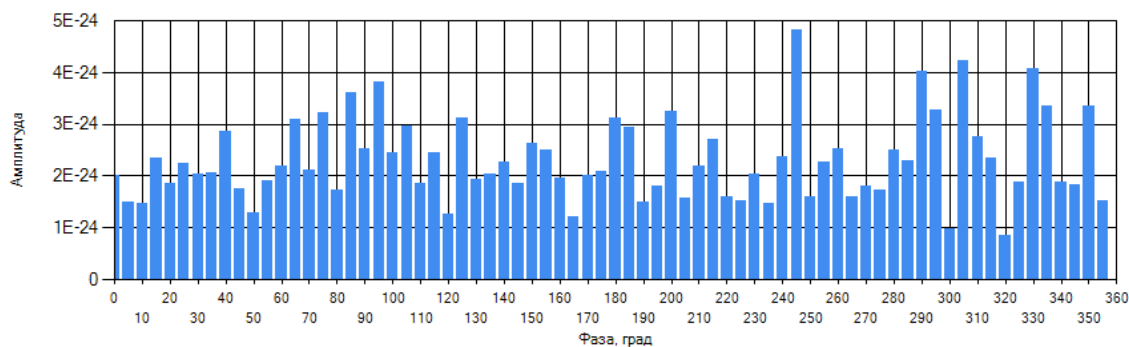


Рис. 2. Амплитудно-фазовое распределение сигнала в месте расположения приемной антенны

На рис. 3 представлено АФР с искажениями, вызванными неоднородностями ионосферы. В качестве неоднородности была взята крупномасштабная неоднородность, с максимумом на краю зоны засветки, спадающая по параболическому закону. Из анализа рисунка следует, что наличие неоднородностей существенно изменяет АФР в месте расположения приемной антенны.

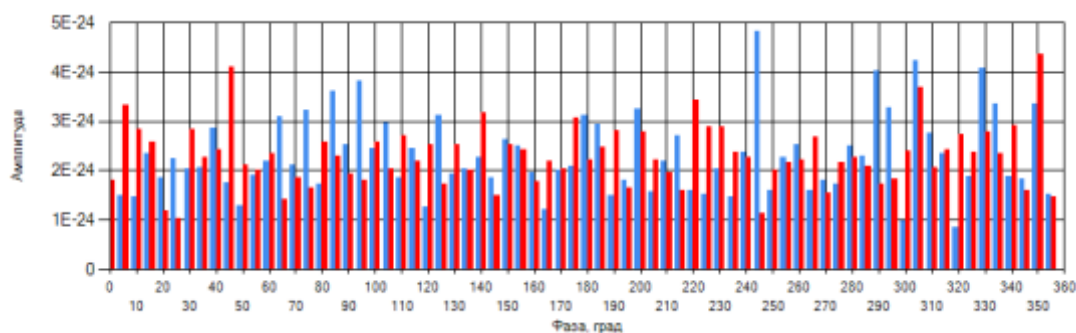
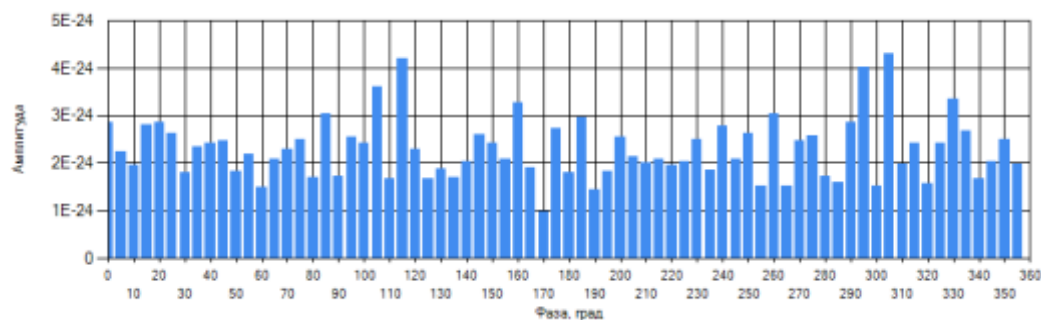


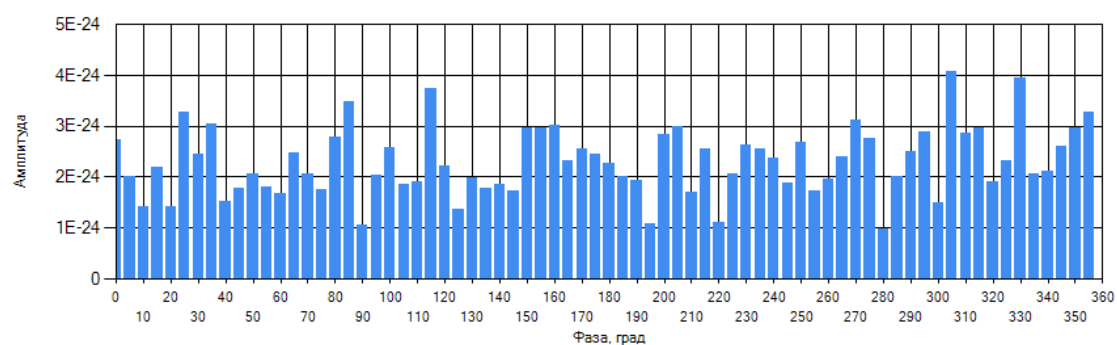
Рис. 3. Амплитудно-фазовое распределение сигнала в месте расположения приемной антенны:
синие линии – без неоднородности в ионосфере;
красные линии – с неоднородностью в ионосфере

На рис. 4 представлено АФР для различной ширины ДН передающей антенной решетки и, соответственно, различной области засветки.

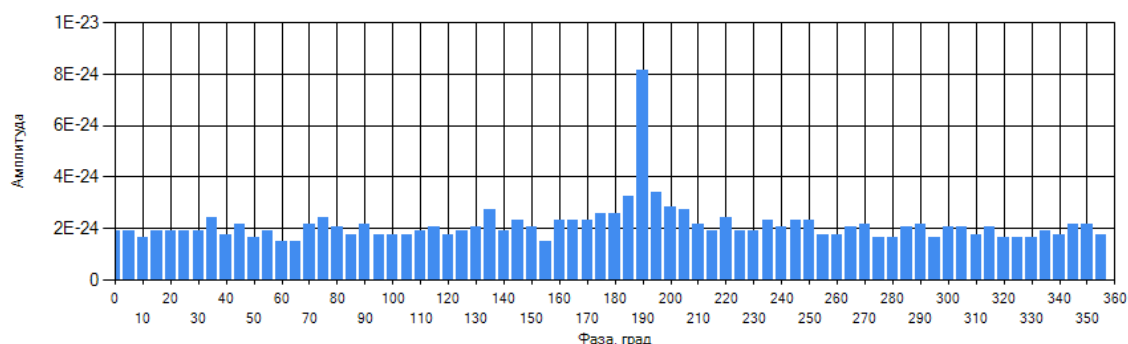


а)

Рис. 4. Амплитудно-фазовое распределение сигнала в месте расположения приемной антенны при различной ширине диаграммы направленности передающей антенны:
а – $(20 \times 1)^\circ$; б – $(20 \times 0,1)^\circ$; в – $(0,1 \times 0,1)^\circ$ (начало)



б)



в)

Рис. 4. Амплитудно-фазовое распределение сигнала в месте расположения приемной антенны при различной ширине диаграммы направленности передающей антенны:
 а – $(20 \times 1)^\circ$; б – $(20 \times 0,1)^\circ$; в – $(0,1 \times 0,1)^\circ$ (окончание)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Знание АФР на апертуре приемной АР позволяет судить об искажениях, обусловленных трассой распространения, что не позволяет с помощью РЛС КВ диапазона обнаруживать стационарные объекты. Это обусловлено малым отношением сигнал/шум, которые на 60–80 дБ ниже значений, необходимых для обнаружения до доплеровской обработки. Одним из способов устранения данного рода искажений и выравнивания АФР на апертуре приемной АР может являться сужение ее ДН. С точки зрения антенной теории, сужение ДН возможно лишь при увеличении размеров АР. Так как размеры антенны в данном диапазоне волн и так определяются от сотен метров до единиц километров, их увеличение нецелесообразно как с экономической точки зрения, так и с позиции увеличения протяженности фидерного тракта, влекущего за собой потерю энергии. Также увеличение продольных размеров АР приводит к потере пространственной когерентности принимаемого сигнала. Сужение ДН возможно без увеличения физических размеров АР за счет методов синтеза апертуры, позволяющих обеспечить значение ширины ДН порядка угловых минут. Как показывает компьютерное моделирование, это приведет к формированию такого АФР на апертуре приемной АР, которое позволит судить о направлении прихода сигнала. Причем можно обеспечить такое отношение сигнал/шум, которое даст возможность определить в области лоцирования квазистационарные объекты.

Список используемых источников

1. *Джузеппе А. Фабрицио* Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, Е.Б. Махияновой, К.В. Юдинцева; под ред. С.Ф. Боева. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 936 с.
2. *Акимов В.Ф., Калинин Ю.К.* Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С.Ф. Боева. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 492 с.
3. *Haselgrove J.* Ray theory and a new method for ray tracing, in: Conference on the Physics of the Ionosphere, Phys. Soc. of London. – London, 1954. – 355 p.
4. *Гуревич А.В., Цедилина Е.Е.* Теоретические исследования сверхдальнего распространения коротких радиоволн // Успехи физических наук. – 1975. – Т. 116, № 7. – С. 540–543.
5. *Анютин А.П.* Пространственно-временная геометрическая теория дифракции сигналов в диспергирующей среде и ее некоторые обобщения // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, № 9. – С. 26–38.
6. *Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н.* Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. – М.: Наука, 1981.
7. *Черкашин Ю.Н., Чернова В.А.* К применению метода параболического уравнения для расчета волновых полей в неоднородной ионосфере // Дифракционные эффекты декаметровых радиоволн в ионосфере. – М.: Наука, 1977. – С. 22–26.
8. *Тинин М.В.* О применении метода возмущений для расчета траектории луча в горизонтальном ионосферном слое // Изв. вузов. Радиофизика. – 1980. – Т. 23, № 4. – С. 498–499.
9. *Лукин Д.С., Палкин Е.А.* Теоретическое и экспериментальное исследование распространения декаметровых радиоволн. – М. [б.и.], 1976. – 194 с.
10. *Jones R.M., Stephenson J.J.* A versatile three – dimensional ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere. – OT Report, 75–76, US. – Washington, USA: Department of Commerce, Office of Telecommunication, US Government Printing Office, 1975. – 185 p.
11. *Ginzburg V.L.* The Propagation of electromagnetic Waves in Plasmas. – Oxford, New York: Pergamon Press, 1970. – 615 p.
12. *Альперт Я.Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972. – 564 с.

А.М. Абшаев*,
доктор физико-математических наук, доцент;
А.Х. Аджиев**,
доктор физико-математических наук, профессор;
Н.Е. Веремей***,
кандидат физико-математических наук;
Ю.А. Довгалюк***,
кандидат физико-математических наук;
Ю.П. Михайловский***,
кандидат физико-математических наук;
В.Б. Попов***,
кандидат физико-математических наук;
А.А. Синькевич***,
доктор технических наук;
М.Л. Торопова***

* НПЦ «Антиград», г. Нальчик.

** Высогогорный геофизический институт, г. Нальчик.

*** Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА ПО ДАННЫМ ЭМПИРИЧЕСКОЙ И ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛЕЙ

В настоящей работе исследованы результаты численного моделирования случая грозы на Северном Кавказе с использованием численной трехмерной нестационарной модели конвективного облака. Впервые подробно рассматриваются характеристики облака на различных этапах электризации. Показано, что результаты моделирования в основном соответствуют эмпирическим критериям электризации грозового облака. Рассмотрены особенности верификации при помощи эмпирической модели; продемонстрировано, что универсальность и масштабируемость делают ее удобным инструментом для решения подобных задач.

Ключевые слова: электризация, гроза, численная модель, эмпирическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование грозовых явлений в атмосфере вызвано неразрывными взаимодействиями процессов различной природы: гидро(термо)динамических и электрических. При всей недостаточной изученности данного вопроса одним из важнейших направлений исследований являются процессы электризации в конвективных облаках.

Процессы электризации в конвективных (грозовых) облаках исследуются как при помощи натуральных экспериментов, так и с использованием различного рода моделей. Натурные данные, как правило, достаточно сложно получить, в то время как модели являются перспективным и доступным инструментом исследования физических процессов. Однако надо отметить, что надежная интерпретация результатов требует использования этих данных в комплексе. Модели (численные и не только) построены на эмпирических данных и (или) требуют контроля (проведения процедуры верификации и валидации). Такой контроль имеет целью постоянное совершенствование моделей и получение новых знаний о процессах в природной системе.

Целью описанного в настоящей публикации исследования было изучение процессов электризации в конвективных облаках при помощи двух моделей: трехмерной численной модели конвективного облака (разработанной в ГГО им. А.И. Воейкова) и эмпирической модели электризации конвективных облаков [1]. Исследование проводилось на примере случая грозы в районе г. Пятигорск 29 мая 2012 года. Новизна настоящего исследования

заключается в комплексном использовании двух моделей при рассмотрении электрических характеристик облака.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбранный для исследования случай отличается интенсивностью конвективных процессов – по данным наблюдений, гроза сопровождалась выпадением слоя града. Геофизические наблюдения проводились при помощи спутника (Метеосат), радиолокатора и грозорегистратора LS8000. При анализе данных наблюдений рассматривалась высота верхней границы облака по спутниковым и радиолокационным данным, температура верхней границы, электрические токи в облаке, данные о количестве электрических разрядов, радиолокационная отражаемость облака, осадки и другие характеристики [2, 3].

Численное моделирование указанного выше случая проводилось при помощи трехмерной численной (нестационарной) модели конвективного облака [4]. Модель включает в себя описание основных процессов в облаках: динамику воздушных потоков, микрофизические переходы и взаимодействие облачных элементов, осадкообразование и электризация облачных частиц. Модель также учитывает широкий спектр процессов электризации, контактные и ионные механизмы. Она позволяет получать и исследовать трехмерные поля характеристик грозных облаков.

Эмпирическая модель электризации грозных облаков подробно описана в [1] и основана на анализе большого количества данных. По результатам самолетных исследований были выделены характерные параметры конвективных облаков при их электризации, при чем эти параметры универсальны для различных регионов нашей планеты. Среди этих параметров находятся высота (H) и температура (T_{top}) верхней границы облака, мощность облака выше нулевой изотермы ($dH > 0$), общая мощность облака (dH), значение напряженности электрического поля над верхней границей облака (при пролете приблизительно на 200 м выше верхней границы), диаметр облака (D), максимальная отражаемость от осадков (Z_{oc}) и от самого облака (выше уровня конденсации, Z_{ob}). Выделены параметры по трем группам облаков: поEL – электризации не наблюдается, EL0 – начало электризации облака, в итоге электризация наблюдалась в части рассматриваемых случаев, EL1 – при данных параметрах облаков организованная электризация наблюдалась всегда. Значения параметров указаны в табл. 1 и дополнены значениями по результатам численного моделирования исследуемого случая.

Таблица 1

Параметры облака при электризации по данным эмпирической модели (ЭМ) и численной модели (ЧМ) конвективного облака

Параметры облака	ЭМ	ЭМ	ЧМ	ЭМ	ЧМ
	noEL	EL0		EL1	
Мощность переохлажденной части облака ($dH > 0$, км)	<1,6	1,6 – 2,6	2,0	>2,6	4,2
Максимальная отражаемость в облаке (дБZ)	<10	10 – 40	–	>40	–
Максимальная отражаемость от осадков (дБZ)	<0	0 – 40	–	>40	–
Диаметр облака (км)	<3	3 – 6	5,4	>6	6,2
Мощность облака (dH , км)	<2,0	2,0 – 3,2	4,2	>3,2	6,2
Высота верхней границы (H , км)	<3,2	3,2 – 4,6	5,5	>4,6	7,5
Температура верхней границы (T_{top} , °C)	> - 8	-8 – -22	-15,6	< -22	-31,8

Важной особенностью и характеристикой электризации, не вошедшей в таблицу, являются значения E_z над верхней границей облака: небольшие положительные значения, характерные для поля хорошей погоды, – до начала электризации; значения >100 В/м – при начале электризации; значительный рост E_z (и возможная смена знака) – при организованной электризации.

Выбор параметров эмпирической модели электризации обусловлен базовой гипотезой о том, что для начала организованной электризации в облаке необходимо наличие крупных ледяных частиц. Косвенными критериями их наличия (создания условий для их наличия) можно считать указанные выше параметры. В настоящем исследовании параметры были получены по результатам численного моделирования для рассматриваемого случая и сопоставлены с эмпирической моделью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Опишем эволюцию моделируемого облака, изменение во времени его характеристик, прямо или косвенно указывающих на процессы электризации. На начальном этапе формирования облака внутри него расположен слабый отрицательный заряд, напряженность электрического поля вблизи верхней границы облака близка к полю хорошей погоды и имеет положительный знак. Вершина облака пересекает изотерму 0°C на 10-й мин развития, на 13-й мин начинают выпадать осадки (дождь).

Начало процессов электризации облака связано с появлением ледяных кристаллов в облаке на 17-й мин, верхняя границы пересекает изотерму -15°C . О начале электризации в это время свидетельствует значение напряженности электрического поля над облаком, которое впервые превышает 100 В/м. В течение минуты вершина облака пересекает изотерму -22°C .

На 20-й мин зафиксированы максимум вертикальной скорости в облаке, в это же время формируются первые электрические разряды – через 3 мин после начала электризации. На 23-й мин наблюдается максимум концентрации ледяных частиц в облаке и начинает выпадать град. Продолжается «взрывное» развитие облака до перехода его на 25-й мин в стадию стационарирования. От момента начала электризации и до вступления в стадию стационарирования фиксируется резкое изменение характеристик облака: рост верхней границы облака и, соответственно, уменьшение температуры на уровне верхней границы, увеличение мощности облака и его переохлажденной части, увеличение интенсивности осадков. Данные особенности отражены на рис. 1.

Стадия стационарирования характеризуется грозовой деятельностью (напряженность электрического поля достигает «пробойных» значений, частота разрядов составляет до 0,5 разрядов в минуту). На 48-й мин происходит отделение наковальни от облака и начинается его диссипация. Грозовая деятельность продолжается до 75 мин.

С начала электризации в верхней части облака определяющим является положительный заряд, напряженность электрического поля над облаком, соответственно, принимает отрицательные значения вплоть до окончания грозовой деятельности. Облако на протяжении большей части времени развития имеет двухполюсную зарядовую структуру (сверху – «плюс»), за исключением времени до начала электризации (в облаке слабый отрицательный заряд) и времени «взрывного» развития, когда ненадолго формируется пятиполюсная зарядовая структура облака (сверху – «плюс»).

В ходе исследования были получены характеристики облака в момент начала электризации и момент начала организованной электризации (см. табл. 1). Численная модель конвективного облака показала хороший результат при сравнении с эмпирической моделью – критерии эмпирической модели выполняются. Радиолокационная отражаемость в данном исследовании не рассматривалась.

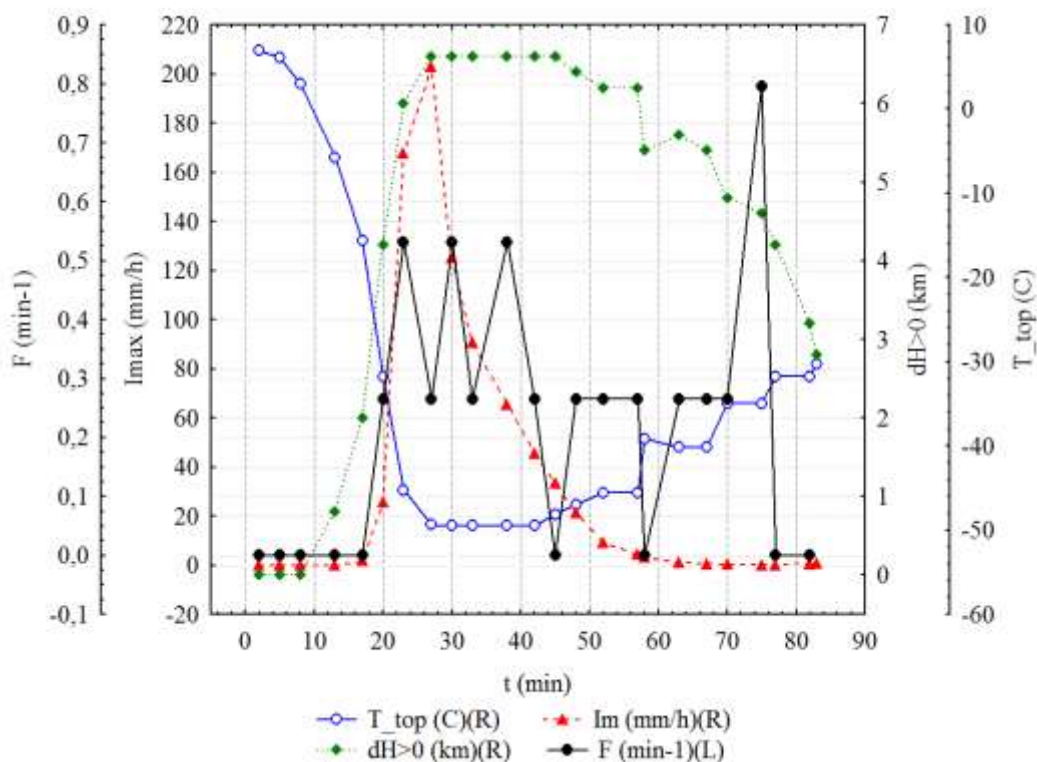


Рис. 1. Изменение характеристик облака в ходе его развития:
 T_{top} – температура верхней границы; $dH>0$ – мощность переохлажденной части облака; I_{max} – максимальная интенсивность осадков;
 F – частота электрических разрядов

ПРИНЦИПЫ, ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ

Прежде всего нужно отметить, что задача верификации и валидации численных моделей чрезвычайно сложна. Процедура верификации и валидации является обязательной для любой (численной) модели и для любого программного обеспечения или математической модели. При понятной всем обязательности сама процедура, выбор оценок и их применение остаются целиком и полностью на усмотрение разработчика (собственно валидация и верификация).

Если обратиться к официальным документам, то для задач валидации численной модели конвективного облака можно руководствоваться ГОСТ Р 57700.17-2018 «Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование дозвуковых течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО». Как известно, выделяют целый ряд источников ошибок моделирования: 1) несоответствие математической модели рассматриваемым процессам; 2) погрешность в граничных условиях; 3) погрешность аппроксимации дифференциальных уравнений разностными схемами; 4) ошибки округления чисел в компьютере; 5) погрешность самого эталонного результата, если он получен экспериментально. Исследования погрешностей, вызываемых численными методами и граничными условиями, достаточно хорошо известны, поэтому здесь они не обсуждаются, так же как и соответствие численной модели – математической. Не обсуждаются и ошибки округления чисел в компьютере, хотя следует отметить, что авторы обнаружили в ходе многочисленных экспериментов незначительные расхождения в результатах, полученных при использовании различных суперкомпьютеров и разных версий компилятора.

В ГОСТ Р 57700.17-2018 говорится, что валидация должна проводиться путем сравнения с эталонными данными, полученными экспериментальным путем, или же в результате тестов

вых расчетов. По самым общим соображениям, получение эталона на основании экспериментальных данных с той же пространственно-временной дискретностью, что и у модели представляется затруднительным (если вообще возможным). Тот же документ предлагает разработчикам самостоятельно определять требуемую точность модели, исходя из потребностей конкретного потребителя. Отдельным источником ошибок моделей физического процесса стоит отметить те, которые вызваны упрощениями математической модели – по причине незнания особенностей протекания процессов или же для уменьшения времени счета (так называемые параметризации – обобщенные и упрощенные описания физических процессов, как правило, полуэмпирические). Обратимся к другой непростой части процедуры проверки – верификации.

Верификация, т.е. поиск ошибок в модели, тесно связана с процедурой валидации. Разработчик модели (и авторы статьи) в определенный момент оказываются в ситуации, когда нужно определить наличие критических ошибок, искажающих физику процессов, оценить результат и определить, для какого круга задач полученный результат (и разработанная модель) может использоваться. В таком случае одним из наилучших методов следует считать использование эмпирических моделей в качестве такого инструмента верификации.

Рассмотрим подробнее эмпирическую модель электризации конвективного облака [1], которая использовалась в данном исследовании. Модель была разработана на основании данных полетов в таких регионах, как Северо-Запад России, Черноморское побережье Кавказа, Молдавия, Куба. Исследуемые параметры позволили получить характерные величины при переходе облака в грозовую стадию. Универсальность полученных закономерностей дает возможность использовать эмпирическую модель как инструмент в ходе проведения верификации при исследовании облаков различных регионов мира. Величины, выбранные в качестве контролируемых параметров, одновременно просты в использовании, понятны и физически обоснованы. Как было ранее показано теоретически и подтверждено данными экспериментов, облака переходят в грозовую стадию при достаточно хорошо развитой переохлажденной части, и ключевую роль в электризации облака играют крупные ледяные частицы. Оценка параметров проводилась при комплексных радиофизических измерениях. Выбранные параметры свидетельствуют о важности вертикального развития облака, положения нулевой изотермы, наличия крупных ледяных частиц и частиц осадков. Напряженность электрического поля как интегральная характеристика зарядов в атмосфере считается надежным показателем, хотя и сложным в измерении.

Помимо универсальности огромным достоинством эмпирической модели, как инструмента верификации, является ее масштабируемость. В математической модели облака представлены в виде течения сложной по своему составу паровоздушной смеси, с учетом турбулентности, фазовых переходов воды в атмосфере и механизмов передачи и перераспределения зарядов частиц. При этом задаются определенные граничные условия – облако находится внутри расчетной области, время его развития ограничено временем расчета. Важнейшей особенностью конвективных процессов в природе является их нестационарность. Таким образом, время становится важной переменной. При прямом сравнении данных экспериментов и данных натурных наблюдений мы сталкиваемся с некоторыми сложностями при попытке синхронизации исследуемых процессов. Пример данных натурных наблюдений для рассматриваемого случая грозы в районе Пятигорска приведен на рис. 2 – температура и высота верхней границы облака (последняя – по данным радиолокационных и спутниковых измерений). Временная шкала охватывает только период, когда были зарегистрированы разряды, и превышает время модельного расчета в целом (оно составляет 100 мин). В таком случае видится разумным оценивать общие физические закономерности и экстремумы – и эмпирическая модель конвективного облака в данном случае является крайне удобным инструментом, так как она учитывает нестационарность и взаимосвязи процессов в облаке, но при этом не привязана жестко ко времени развития облака.

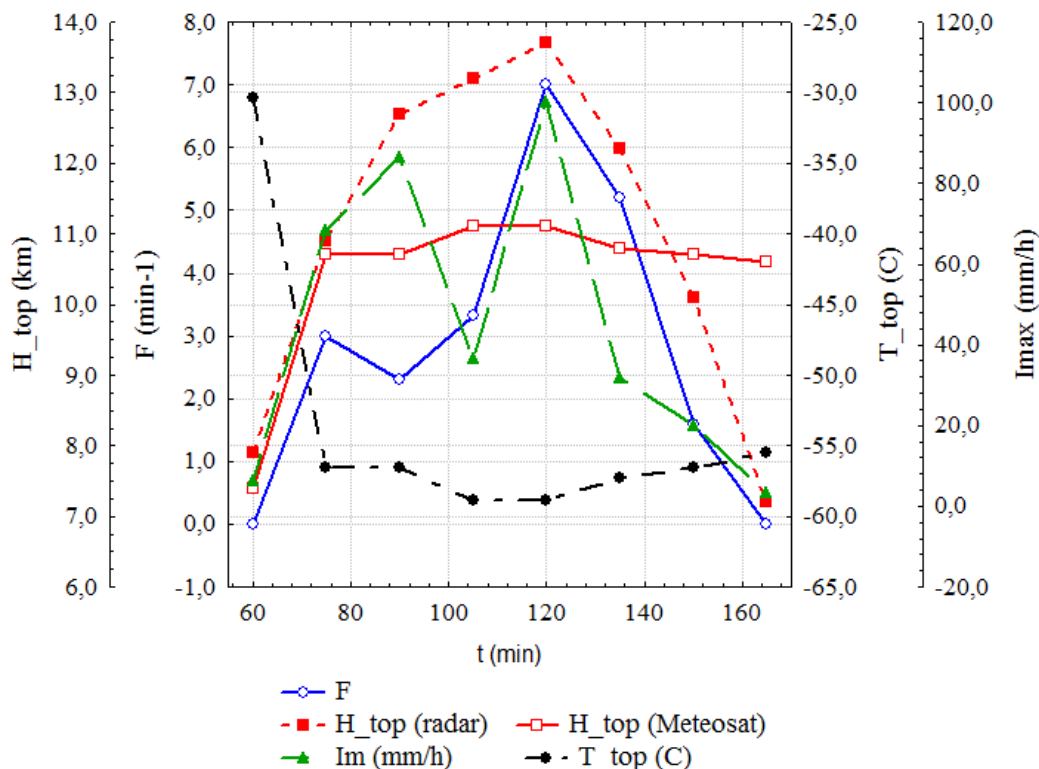


Рис. 2. Изменение характеристик облака в ходе его развития по данным геофизических наблюдений во время электрических разрядов: F – частота разрядов облако – земля; $H_{top} (radar)$ – верхняя граница облака по данным радиолокатора; $H_{top} (Meteosat)$ – верхняя граница облака по спутниковым данным; Im – максимальная интенсивность осадков; T_{top} – температура верхней границы облака

Указанным образом были рассмотрены показатели, приведенные в табл. 1. Эмпирическая модель также предлагает уравнение множественной шаговой регрессии, определяющее зависимость напряженности электрического поля от всех рассматриваемых контролируемых параметров. В численной модели такие зависимости обнаружены не были. Несмотря на это, отдельные критерии соответствуют пороговым значениям и может быть сделан вывод о том, что верификацию численной модели конвективного облака по данным эмпирической модели электризации конвективного облака следует считать в целом успешной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В описанном выше исследовании была рассмотрена динамика характеристик грозового облака по данным численного моделирования. Главным предметом исследования явились особенности процесса электризации, а именно – момент начала организованной электризации и момент начала молниевой активности. Полученные результаты численного моделирования соответствуют универсальным критериям, указанным в эмпирической модели электризации конвективного облака – как качественно, так и количественно. Данный факт свидетельствует о высокой степени достоверности трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака, разработанной в ГГО им. А.И. Воейкова. Такие результаты позволяют получать поля значений электрических характеристик в облаке, отдельных его частях и окрестностях, что является предметом для дальнейших исследований.

Показано, что эмпирическая модель обладает рядом преимуществ перед другими оценками, используемыми для верификации; главные ее достоинства – универсальность и масштабируемость. Представляется важным использовать эмпирическую модель в ходе верификации численных моделей конвективного облака.

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.spbstu.ru>).

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант БРИКС_m 18-55-80020).

Список используемых источников

1. Михайловский Ю.П. О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 580. – С. 125–138.
2. Слияние конвективных облаков / А.А. Синькевич, Ю.А. Довгалюк, Н.Е. Веремей, Ю.П. Михайловский. – СПб., 2018. – 280 с.
3. Исследования развития грозо-градового облака. Ч. 3. Численное моделирование эволюции облака / А.А. Синькевич, Ю.А. Довгалюк, Н.Е. Веремей и др. // Метеорология и гидрология. – 2017. – №8. – С. 18–28.
4. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака / Н.Е. Веремей, Ю.А. Довгалюк, М.А. Затевахин и др. // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. – С. 45–92.

А.Х. Аджиев*,
доктор физико-математических наук, профессор;
З.М. Керефова*,
кандидат физико-математических наук;
А.Г. Клово**,
кандидат физико-математических наук;
Т.В. Кудринская**,
кандидат физико-математических наук;
Г.В. Куповых**,
доктор физико-математических наук, профессор;
Д.В. Тимошенко**,
кандидат физико-математических наук;
А.А. Черкесов*
* Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик.
** Южный федеральный университет, г. Таганрог.

АНАЛИЗ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРО-КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

Представлены данные многолетних наблюдений за элементами атмосферного электричества в районе Эльбруса. Установлена глобальная репрезентативность данных измерений электрического поля. Пункты наблюдений в высокогорной зоне рекомендованы для мониторинга электрического поля атмосферы на глобальном и региональном уровнях.

Ключевые слова: атмосферное электричество, электрическое поле, унитарная вариация, мониторинг, Приэльбрусье.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг электрического поля атмосферы, а также решения ряда специальных задач атмосферного электричества требуют глобально-репрезентативных данных наблюдений за элементами атмосферного электричества. Пункты наблюдения, расположенные в горных условиях Северного Кавказа, могут служить основой для осуществления глобального и регионального мониторинга и контроля антропогенного воздействия на атмосферу.

Первые исследования электрических характеристик атмосферы в районе Эльбруса проводились на Пике Терскол, Приюте-11, в долине Азау, последние из них – в конце 50-х годов [1]. Исследования электрических характеристик приземной атмосферы в высокогорных районах возобновились в 1986–1988 годах на трех станциях в Приэльбрусье: Нижний Архыз (2000 м), Шаджатмаз (2100 м) и Пик Чегет (3040 м) [2]. Наиболее устойчивой особенностью суточных вариаций электрического поля на высокогорных станциях, расположенных выше 2000 м н.у.м., является утренний минимум (01–04 UT) и вечерний максимум (16–22 UT). От месяца к месяцу и от станции к станции изменяются лишь относительные величины этих минимумов и максимумов. Подобие суточных вариаций электрического поля в высокогорных условиях кривой Карнеги позволило предположить, что описанная выше устойчивая закономерность обусловлена глобальной унитарной вариацией ионосферного потенциала. Условие выделения унитарной вариации на фоне локальных возмущений, обусловленных изменчивостью приземной атмосферы, характеризует степень репрезентативности данных той или иной высокогорной станции в те или иные месяцы. Для станции Пик Чегет, расположенной на высоте 3040 м н. у. м. это условие выполнялось в течение всего времени, что

позволило рекомендовать ее для проведения фоновых измерений атмосферного электричества. В 1989–1992 годах на Пике Чегет проводились комплексные наблюдения за элементами атмосферного электричества (напряженности электрического поля, проводимости воздуха и плотности тока) [3]. В 2003–2004 годах атмосферно-электрические наблюдения проводились на станции Кызбурун (700 м н. у. м.) и на Пике Терскол (3003 м н. у. м.) [4]. С 2012 года организованы непрерывные измерения напряженности электрического поля на станциях Пик Чегет и Кызбурун (700 м). Используемый автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс позволяет не только регистрировать данные наземных атмосферно-электрических наблюдений в режиме реального времени, но и обрабатывать их [5, 6].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Горные условия характеризуются достаточно высокими значениями концентрации легких ионов в приземном слое атмосферы (табл. 1). Коэффициент униполярности обычно больше единицы, что объясняется действием электродного эффекта вблизи земной поверхности.

Таблица 1

Средние значения концентрации легких ионов и удельной активности радионуклидов в почве (Пик Чегет)

Год	Концентрации легких ионов		Удельная активность радионуклидов, Бк/кг		
	n_+ , ион/см ³	n_- , ион/см ³	Ra-226	Th-232	K-40
2015	930	710	52	63	822
2016	920	550	47	57	755

При практическом отсутствии аэрозольного загрязнения воздуха основными факторами, определяющими динамику электрического состояния приземной атмосферы, являются турбулентное перемешивание и степень ионизации воздуха.

Средние значения напряженности атмосферно-электрического поля в условиях «хорошей погоды» для летнего сезона в горных пунктах наблюдений мало меняются по годам и имеют следующие средние значения: Пик Чегет – 550–650 В/м, Кызбурун – 200–250 В/м (рис. 1). Высокие значения напряженности поля в высокогорном пункте обусловлены сложной топографией местности (площадка станции представляет собой местный гребень).

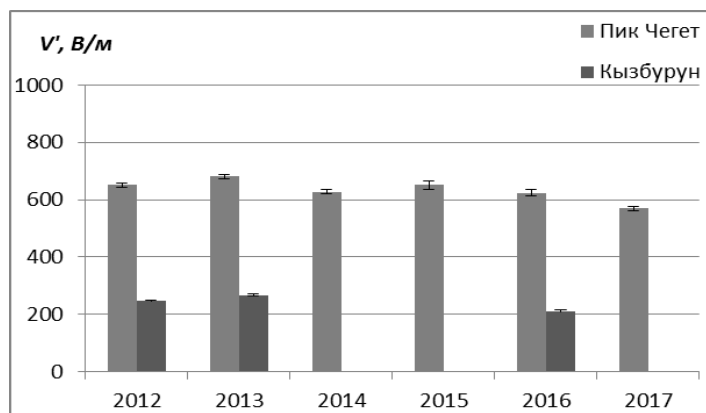


Рис. 1. Средние значения напряженности атмосферно-электрического поля (Пик Чегет, лето)

В табл. 1 приведены также данные содержания естественных радионуклидов (радия Ra-226, тория Th-232, и калия K-40) в почве. Полученные значения удельной активности радионуклидов в почве на территории наблюдательной площадки значительно выше по сравнению с равнинными почвами. Для сравнения: средние значения активности радионуклидов для типичных почв Ростовской области следующие: Ra-226 – 25–35 Бк/кг, Th-232 – 20–40 Бк/кг, K-40 – 250–500 Бк/кг [5, 6]. Отметим, что атмосфера в высокогорном пункте характеризуется низким уровнем радиоактивного α -излучения (концентрация радона менее 30 Бк/м³), и при этом наблюдается повышенный уровень γ -излучения (мощность эквивалентной дозы составляет 0,25 мкЗв/ч) [5, 6]. Можно сделать вывод, что повышенное содержание легких ионов связано с более высоким уровнем гамма-излучения (космическое излучение) и с малым содержанием аэрозолей (переход легких ионов в разряд тяжелых).

Вариации атмосферно-электрического поля за период 2012–2017 годов имеют хорошую степень согласованности. В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции для среднесуточных значений атмосферно-электрического поля за разные годы (рассматриваемый период: июль – август).

Таблица 2

**Значения коэффициента парной корреляции
для значений напряженности поля приземной атмосферы**

	2012	2014	2015	2016
2014	0,88	-	-	-
2015	0,88	0,94	-	-
2016	0,87	0,97	0,93	-
2017	0,82	0,95	0,84	0,95

Суточный ход атмосферно-электрического поля характеризуется наличием минимума (02–04 UT) и максимума (17–19 UT), при этом для летнего периода в высокогорном пункте часто наблюдается дополнительный максимум. Отклонения от среднесуточного значения для станций в среднем составляют: для минимумов – 20–35%, для максимумов – 15–20%.

На рис. 2 представлены суточные вариации атмосферно-электрического поля, полученные на основании экспериментальных данных за период июль – август 2016 года для двух горных пунктов: Пик Чегет и Кызбурун (540 среднечасовых значений). Ряды динамики напряженности электрического поля атмосферы в указанных пунктах, полученные при синхронных измерениях, имеют достаточно высокие коэффициенты корреляции [7, 8].

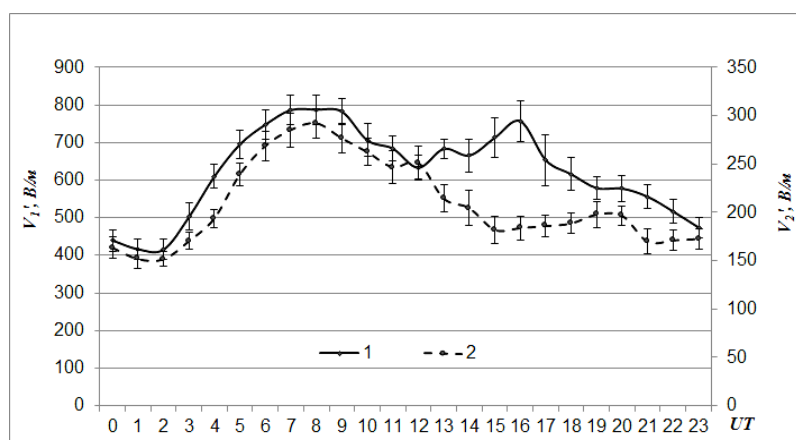


Рис. 2. Суточный ход напряженности атмосферно-электрического поля (лето 2016-го):
1 – Пик Чегет; 2 – Кызбурун

На рис. 3 показана диаграмма распределения средних месячных значений электрического поля приземной атмосферы в течение года на основе двухлетних наблюдений в высокогорных условиях.

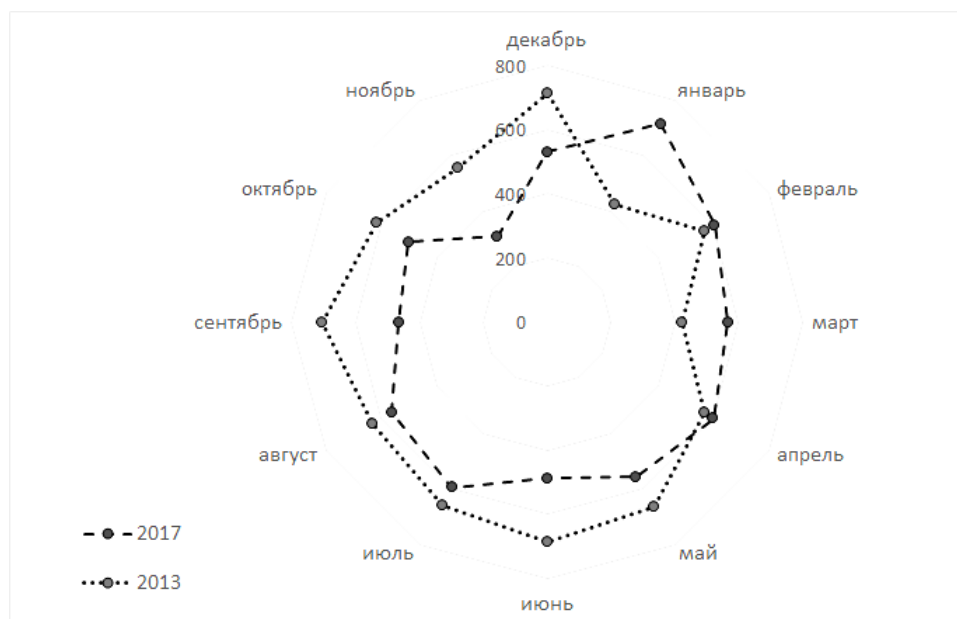


Рис. 3. Годовой ход напряженности атмосферно-электрического поля (Пик Чегет)

В сезонных изменениях атмосферно-электрического поля можно выделить следующие особенности: значения за летний период для двух лет мало отличаются друг от друга, а в зимний период — значительно разнятся. Это связано с метеорологическими условиями и наличием различных явлений (снег, метель, поземка), которые будут влиять на значения атмосферно-электрического поля. В частности, снег и метель сопровождаются высокими значениями напряженности электрического поля (более 5000 В/м), а при дожде наблюдаются уменьшение значений и изменение знака электрического поля [5, 6].

Кроме того, электрическое поле приземной атмосферы реагирует на изменения солнечной активности и климатические характеристики тропосферы. В высокогорных пунктах наблюдается увеличение значений напряженности атмосферно-электрического поля при усилении вспышечной активности Солнца. А увеличение активности геомагнитного поля для высокогорного пункта сопровождается уменьшением величины атмосферно-электрического поля (при этом для равнинных пунктов наблюдается увеличение) [9].

ВЫВОД

Результаты многолетних экспериментальных исследований атмосферного электричества приземного слоя позволяют рекомендовать пункты наблюдений в высокогорных условиях Приэльбрусья для мониторинга электрического поля на глобальном и региональном уровнях.

Список используемых источников

1. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 323 с.

2. Анализ результатов синхронных измерений E в Приэльбрусье и на Кольском полуострове / В.Н. Ерохин, А.С. Канаев, Г.В. Куповых и др. // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Магнитосферные исследования. – М., 1990. – № 15. – С. 44–47.
3. Результаты наблюдений за атмосферным электричеством на горной станции пик Чегет в Приэльбрусье / Г.П. Ваюшина, Г.В. Куповых, А.А. Мартынов и др. // Труды ГГО. – 1995. – Вып. 545. – С. 36–46.
4. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Болдырев А.С.* Атмосферно-электрические наблюдения на Пике Терскол // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству. – Н. Новгород, 2007. – С. 203–204.
5. Атмосферно-электрические наблюдения как метод контроля техногенного воздействия на атмосферу / А.А. Редин, Г.В. Куповых, Т.В. Кудринская, В.В. Гривцов // Технологии техноносферной безопасности. – 2017. – № 1 (71). – С. 271–277.
6. *Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А.* Исследования ионизационного состояния приземного слоя атмосферы в разных геофизических условиях // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 4. – С. 77–84.
7. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В.* Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений // ДАН. Геофизика. – 2015. – Т. 462, № 2. – С. 213–216.
8. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В.* Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 710–715.
9. Effects of solar activity in the electric field variations of the surface atmosphere / T.V. Kudrinskaya, G. Kupovykh, A. Adzhiev et al. // Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, RWP 2019 - Proceedings. – 2019. – P. 572–575.

С.Г. Алёхин*,
кандидат технических наук, доцент;

Р.Д. Иванов*

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ ГОДА НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛЕЙ СРЕДНЕСУТОЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ ФУНКЦИЯМ

Для решения задач оптимального планирования применения аэрокосмических средств дистанционного зондирования Земли предлагается подход к определению границ климатических сезонов года на основе метода разложения метеорологических полей по естественным ортогональным функциям и корреляционного анализа его коэффициентов разложения. Показано, как определять длительные временные связи между комплексными характеристиками температурного поля атмосферы, имеющие сезонные особенности.

Ключевые слова: климатический сезон, естественные ортогональные функции, температура воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

Известный полярный исследователь, океанолог Владимир Юльевич Визе в своем труде [1] отмечал: «Природа слишком многообразна, чтобы ее можно было уложить в рамки календарных сезонов». Это высказывание справедливо, так как календарные сезоны включают в себя по три месяца, а месяцы – это отрезки календарного года, почти равные друг другу по продолжительности и имеющие основное значение для счета времени, они не являются рубежами отдельных периодов, отражающих однотипный ход метеорологических процессов и определенный термический режим какого-либо географического района.

Календарный сезон года в целом представляет собой относительно большой отрезок времени, в течение которого климатические условия не остаются однородными, а претерпевают изменения, достаточные для того, чтобы подразделить сезон года на несколько обособленных периодов – климатические сезоны. Климатические сезоны характеризуют время наступления тех или иных климатических явлений (первые заморозки, выпадение или таяние снега, период дождей или засух и т. п.) и время изменения состояния подстилающей поверхности [2]. Эти особенности климатических сезонов имеют большое значение в задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с помощью авиационных и космических средств в интересах сельского хозяйства, землепользования, лесоводства, геологии, океанографии, метеорологии, а также при мониторинге окружающей среды. Сканирующие устройства средств ДЗЗ получают информацию об объектах в различных диапазонах электромагнитного спектра: оптическом, инфракрасном, радиолокационном. В то же время объекты и подстилающая поверхность, на которой они располагаются, изменяют свои отражательно-излучательные свойства в зависимости от окружающих метеорологических условий, характерных для данного климатического сезона.

Имея в виду важность оптимального планирования аэрокосмической съемки и высокую стоимость ее проведения, целесообразно учитывать периоды времени, когда отражательно-излучательные свойства конкретных объектов и фонов наиболее информативны, т. е. когда при интерпретации полученных изображений высока вероятность идентификации объекта и определения окружающих его географических характеристик местности. Такие периоды времени как раз соответствуют климатическим сезонам года.

Для целей оптимального планирования применения аэрокосмических средств ДЗЗ целесообразно определять границы климатических сезонов года, устанавливать их количество, продолжительность, даты начала и окончания.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вопрос классификации климатических сезонов года и определения их границ широко исследован многими учеными, которые рассматривали его решение с различных позиций. Объем этих исследований не позволяет в настоящей статье провести их сравнительный анализ, поэтому ограничимся ссылками на основные работы, где подобный анализ проведен и описаны методы определения границ климатических сезонов года на основе:

- признаков, характеризующих поступление солнечной радиации [2];
- анализа термического режима атмосферы [3–5];
- генетического подхода [1, 2, 6–11].

В исследованиях, основанных на учете характеристик солнечной радиации, поступающей на поверхность земли, не рассматривают процессы общей циркуляции атмосферы и влагооборота, которые также определяют состояние климатической системы. Работы, в которых проводится детальный анализ термического режима в течение года, опираются на условные признаки, где авторы подходили к определению границ климатических сезонов с одинаковыми критериями для различных широт. Наибольшую значимость имеют синоптико-климатические исследования – работы генетического подхода, но они основаны на анализе сезонной динамики преимущественно только атмосферной циркуляции в территориально крупном масштабе и не дают количественных критериев определения границ климатических сезонов.

В данной работе предлагается подход на основе метода разложения метеорологических полей по естественным ортогональным функциям [12] идей определения климатических границ сезонов года, опубликованных в работах [13, 18].

Метод представления метеорологических полей путем разложения по естественным ортогональным функциям (далее – метод е. о. ф.) является весьма эффективным средством решения различных прикладных задач метеорологии. Он хорошо изучен и широко применяется на практике, поэтому здесь его описание не приводится. Основная особенность метода заключается в комплексном представлении наиболее существенной информации малым числом членов ряда. В отличие от других способов аналитического представления метеорологических полей с помощью специальных функций, естественные составляющие определяются статистически из совокупности полей и потому физически более обоснованы [14–16].

В качестве критерия структуры климатических сезонов года принимается среднесуточная температура воздуха, так как температурное поле хорошо отражает влияние основных климатообразующих факторов: радиационных процессов и изменения солнечной активности, характера общей циркуляции атмосферы, состояния подстилающей поверхности. В качестве комплексных характеристик, определяющих температурное поле, используются коэффициенты разложения полей среднесуточной температуры воздуха по естественным ортогональным функциям.

Основная гипотеза исследования состоит в том, что корреляционные связи во времени этих коэффициентов разложения должны резко изменяться при переходе от одного климатического сезона к другому, тем самым определяя границы сезонов. Внутри климатических сезонов, вследствие однородности атмосферных процессов, коэффициенты корреляции должны быть близкими по величине.

Для определения термина «резкое изменение» использовалось преобразование Фишера, при котором коэффициент корреляции в частных совокупностях приравнивается гиперболическому тангенсу некоторой величины z [12–17]:

$$\tilde{r}_{\hat{x}\hat{y}} = th z, \text{ где } z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\tilde{r}_{\hat{x}\hat{y}}}{1-\tilde{r}_{\hat{x}\hat{y}}}, \quad (1)$$

где \hat{x} и \hat{y} – случайные величины.

Это преобразование можно использовать для исследования изменчивости коэффициентов корреляции, поскольку средняя квадратическая ошибка величины z практически не зависит от истинной корреляции и составляет

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N-4}},$$

где N – это объем выборки.

Доверительный интервал для величины z вычисляется по формуле

$$I_{[z]} = [z - 2\sigma_z; z + 2\sigma_z]. \quad (2)$$

Для поиска резкого изменения корреляционных связей используется левая граница доверительного интервала величины z , так как она соответствует критическому значению коэффициента корреляции, ниже которого он не значим. Даты во временном ряду, где наблюдается первое выполнение неравенства $z - 2\sigma_z \leq 0$, соответствуют границе раздела климатических сезонов.

Для расчета коэффициентов разложения по е. о. ф. температурного поля было выбрано 16 станций в трех районах на различных широтных кругах (условно: «Север», «Центр», «Юг»), характеристика каждой из которых приведена в табл. 1.

Таблица 1

Группы станций для проведения исследования

№ района, климат	Индекс	№ станции, наименование	Координаты	
1. «Север». Климат с избыточным увлажнением	22520	1. Кемь-порт	64,98 с. ш.	34,80 в. д.
	22820	2. Петрозаводск	61,82 с. ш.	34,27 в. д.
	26063	3. Санкт-Петербург	59,97 с. ш.	30,30 в. д.
	27008	4. Бабаево	59,40 с. ш.	35,93 в. д.
	22802	5. Сортавала	61,72 с. ш.	30,72 в. д.
	22845	6. Каргополь	61,52 с. ш.	38,93 в. д.
2. «Центр». Климат с достаточным увлажнением	34009	7. Курск	51,77 с. ш.	36,17 в. д.
	27333	8. Кострома	57,77 с. ш.	40,85 в. д.
	27459	9. Нижний Новгород	56,30 с. ш.	44,00 в. д.
	27612	10. Москва (ВДНХ)	55,83 с.ш.	37,62 в. д.
	27947	11. Тамбов	52,80 с. ш.	41,33 в. д.
3. «Юг». Климат с неустойчивым или недостаточным увлажнением	34861	12. Элиста	46,37 с. ш.	44,33 в. д.
	34172	13. Саратов	51,60 с. ш.	46,00 в. д.
	28900	14. Самара	53,25 с. ш.	50,22 в. д.
	35121	15. Оренбург	51,68 с. ш.	55,10 в. д.
	34356	16. Фролово	49,80 с. ш.	43,70 в. д.

Архив исходных данных среднесуточной температуры воздуха на каждой станции собрался в течение 54 лет – с 1962 по 2015 год. За каждый месяц конкретного года значения среднесуточной температуры воздуха берутся с интервалом в три дня, т. е. за 10 суток, чтобы исключить тесно связанные данные соседних дней. Всего для каждой станции объем выборки составляет около 540 значений среднесуточной температуры воздуха за каждый кален-

дарный месяц, или около 6500 значений за все исследуемые года. Для исключения из расчетов годового хода среднесуточной температуры воздуха использовались ее аномалии.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Прежде всего, проанализируем распределение собственных чисел ковариационных матриц аномалий среднесуточной температуры воздуха, как внутри месяцев, так и по месяцам в течение года. Для этого рассмотрим один из фрагментов таблиц, в которых для каждого месяца получены значения собственных чисел ковариационных матриц аномалий среднесуточной температуры воздуха (табл. 2).

Таблица 2

Собственные числа ковариационных матриц аномалий среднесуточной температуры воздуха. Декабрь, северный район (фрагмент)

Декабрь, λ	Даты										$\lambda^*, \%$
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	
λ_1	151,281	156,954	200,155	218,423	241,006	275,964	256,775	291,840	251,351	287,403	85,669
λ_2	13,243	14,182	18,367	20,017	34,852	14,047	19,641	26,134	29,257	20,507	7,726
λ_3	6,645	9,338	10,135	8,277	10,883	8,794	9,515	11,608	10,898	11,994	3,605
λ_4	2,817	3,175	3,286	3,757	4,798	5,801	3,755	7,402	7,424	4,656	1,722
λ_5	1,100	1,356	1,680	2,566	2,336	2,638	1,746	2,801	2,376	2,880	0,789
λ_6	0,649	0,951	0,982	1,059	1,519	1,822	1,039	2,161	1,506	1,601	0,488
Сумма:	175,735	185,957	234,605	254,099	295,394	309,065	292,471	341,946	302,811	329,042	100,000

В табл. 2 переменной λ^* обозначен (%) вклад j -го члена ряда λ_j в суммарную дисперсию коэффициентов разложения по е. о. ф. полей аномалий среднесуточной температуры воздуха. Число λ_j является собственным числом ковариационной матрицы.

В результате расчетов все собственные числа λ_j положительны. Это означает, что выбранная система точек, откуда снимаются данные наблюдений, хорошо обусловлена, в выборке отсутствуют сильно коррелируемые значения.

Анализ величин вкладов собственных чисел λ_j от месяца к месяцу для трех исследуемых районов показывает:

а) вклады первых членов ряда λ_1 значимо больше остальных, и, следовательно, большую значимость имеют первые коэффициенты разложения a_{1k} , они с большим весом входят в представление полей среднесуточной температуры воздуха с помощью разложения по естественным составляющим. Поэтому поля среднесуточной температуры воздуха очень точно можно представить только первым членом ряда разложения по е. о. ф.;

б) с увеличением порядкового номера λ_j естественные составляющие описывают метеорологические процессы, масштаб которых постепенно уменьшается. Вместе с уменьшением масштаба уменьшается и вклад естественной составляющей в описание суммарной дисперсии поля среднесуточной температуры воздуха. Самые последние е. о. ф. характеризуют турбулентные свойства полей, либо соответствующие им доли суммарной дисперсии находятся на пределе статистической значимости и по существу относятся к ошибкам в представлении полей;

в) вклады первых членов ряда λ_1 от зимы к лету снижаются до 8% на «Севере», до 5,5% в «Центре» и до 6% на «Юге». В то же время вклады следующих трех членов ($\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$) в этот период незначительны, но увеличиваются на 2-3% на «Севере» и в «Центре», на 4-5% на Юге. То есть от зимы к лету относительно уменьшается роль крупномасштабных процессов и увеличивается роль мелкомасштабных в связи с сезонными изменениями астрономических, синоптических, климатических и других процессов. Для более правильного описания

мелкомасштабных процессов (если необходимо) используют густую сетку точек (станций), потому что они сильнее реагируют на число и расположение точек поля.

Так как собственные числа ковариационной матрицы равны дисперсиям коэффициентов разложения, в подтверждение сделанных выводов на рис. 1 представлена сравнительная характеристика распределений суммарной дисперсии коэффициентов разложения по е. о. ф. полей аномалий среднесуточной температуры воздуха в течение года для исследуемых районов. Из анализа рисунка видно, что в холодное время года значения дисперсий коэффициентов разложения по е. о. ф. на севере более чем в 1,5 раза превышают аналогичные значения в центре и на юге. В теплое время года эти значения для всех районов в 3–5 раз меньше, практически они выравниваются, но эпизодически на юге они выше остальных.

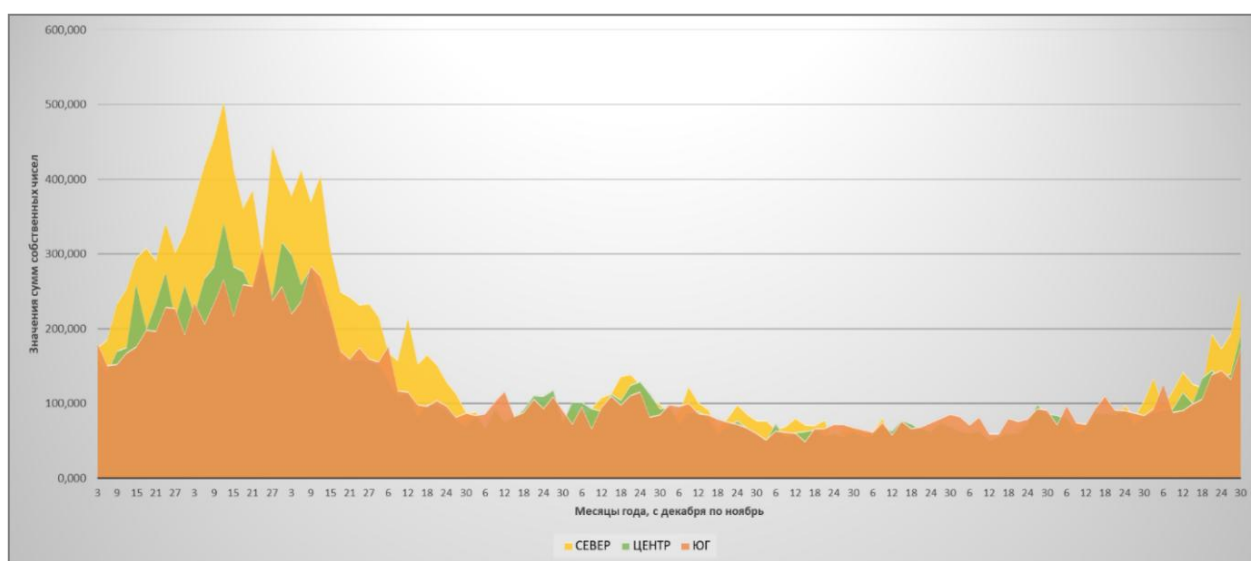


Рис. 1. Распределение суммарной дисперсии коэффициентов разложения по е. о. ф. полей аномалий среднесуточной температуры воздуха в течение года для трех районов

В результате проведенных исследований с помощью метода е. о. ф. установлено по 11 климатических сезонов в северном и центральном районах, 13 сезонов – в южном районе. Поля среднесуточной температуры воздуха имеют особые районы, выделяющиеся по своей пространственной и временной структуре. К аналогичным выводам исследователи приходили и ранее [12–14]. Было показано, что для отдельных станций с увеличением временного интервала корреляционная функция затухает слабее и на некоторой ее величине при $z - 2\sigma_z \leq 0$ сказываются сезонные особенности полей. Метод разложения по е. о. ф. метеорологических полей позволяет определять такие районы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе подход является физико-статистическим, поэтому следует заметить, что на устойчивость временных границ климатических сезонов влияет характер исходного статистического материала – количество и качество данных метеорологических наблюдений. С учетом проведенных исследований, а также положений климатологии дадим несколько рекомендаций по подготовке исходных данных для проведения подобного рода исследований:

– при определении границ климатических сезонов методом е. о. ф. необходимы данные метеорологических наблюдений с 5–10 станций, находящихся в районе с радиусом не более 200 км, расположенных симметрично относительно выбранного сектора круга широты;

– все исходные ряды метеорологических наблюдений должны быть однородными за период не менее 30 лет;

– период времени, который определяет длину ряда метеорологических наблюдений, должен быть максимально приближен к моменту решения задачи определения границ климатических сезонов года.

Таким образом, в результате проведенных исследований предложен новый научно-методический подход определения границ климатических сезонов года и их количественных характеристик. Практическая реализация разработанного авторами подхода на основе метода е. о. ф. позволит достаточно оперативно и оптимально планировать применение аэрокосмических средств ДЗЗ с учетом спектральных диапазонов, в которых они функционируют.

Список используемых источников

1. Визе В.Ю. Климат морей советской Арктики. – Л.-М., 1940.
2. Галахов Н.Н. Изучение структуры климатических сезонов года. – М.: АН СССР, 1959. – 182 с.
3. Лебедев А.Н., Писарева Г.П. Климатические сезоны СССР // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1956. – Вып. 62(124). – С. 67–84.
4. Кайгородов А.И. О временах года в связи с аналитическими и сравнительно климатическими приемами их изучения // Геофизика и метеорология. – 1927. – Вып. 2, т. IV. – С.189–210.
5. Баранов А.И. Климатические времена года в Европейской части СССР // Труды института географии АН СССР. – 1950. – Вып.4.
6. Егорова В.И. Опыт установления границ и характеристик естественных синоптических сезонов // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1956. – Вып. 65(127). – С. 41–69.
7. Бутакова А.С. Весенний период в Ленинградской области в связи с динамикой атмосферных процессов // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1938. – Вып.25.
8. Мультановский Б.П. Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды. – М. : ЦУЕГМС, 1933. – Ч. 1. – 139 с.
9. Пагава С.Т. Естественный синоптический сезон // Метеорология и гидрология. – 1949. – Вып.4. – С. 36–41.
10. Исаев Э.А. Синоптические процессы над Атлантическим океаном и Евразией. – Л.: Гимиз, 1955.
11. Ловейко М.В. Начало синоптической весны и прилет грачей в Ленинграде. – Л.: Изд-во ГГО, 1929.
12. Естественные составляющие метеорологических полей: монография. / А.В. Мещерская, Л.В. Руховец, М.И. Юдин, Н.И. Яковлева. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 199 с.
13. Чувашина И.Е. Корреляционный метод определения климатических границ сезонов года // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1976. – Вып. 367. – С. 68–80.
14. Мещерская А.В., Блажевич В.Г., Леднев К.В. Разложение полей средней суточной температуры по естественным ортогональным функциям с учетом годового хода температуры // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1969. – Вып. 236. – С. 106–119.
15. Яковлева Н.И., Мещерская А.В., Кудашкин Г.Д. Исследование полей давления (геопотенциала) методом разложения по естественным составляющим // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1964. – Вып. 165. – С. 78–104.

16. Яковлева Н.И., Репинская Р.П., Гурлева К.А. К определению связности процессов во времени и ее сезонные особенности // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1968. – Вып. 201. – С. 52–59.

17. Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии. – Л.: Гидрометеопиздат, 1967. – 242 с.

18. Алёхин С.Г., Иванов Р.Д. Методика установления границ естественных климатических сезонов года на основе анализа временных рядов среднесуточной температуры воздуха // Материалы V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / под общ. ред. Ю.В. Кулешова; редкол.: Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин и др.; отв. за вып.: А.С. Тимощук. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С.51–60.

А.В. Артюшина*;

Т.Б. Журавлева*;

доктор физико-математических наук;

И.М. Насртдинов*;

кандидат физико-математических наук

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

ВЛИЯНИЕ 3D ЭФФЕКТОВ ОБЛАКОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СХЕМЕ ЛИМБОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Представлены результаты статистического моделирования переноса солнечного излучения в сферической атмосфере для схемы лимбового зондирования с учетом эффектов стохастической геометрии жидкокапельной облачности (видимый диапазон). Показано, что 3D эффекты облаков определяют основные закономерности формирования полей яркости солнечного излучения для высоты зондирования от уровня подстилающей поверхности до верхней границы облачности. Приведено сопоставление усредненной по множеству реализаций интенсивности разорванной облачности с интенсивностью безоблачного неба и сплошной облачности в зависимости от высоты линии перигея и условий освещенности.

Ключевые слова: статистическое моделирование, лимбовое зондирование, разорванная облачность, интенсивность солнечного излучения

ВВЕДЕНИЕ

Одной из широко используемых в настоящее время схем спутникового зондирования атмосферы Земли является лимбовое визирование на касательных трассах. Данная схема позволяет исследовать общее содержание и вертикальное распределение различных атмосферных газов и аэрозоля от верхней тропосферы до нижней мезосферы по результатам измерений спектральной прозрачности (SAGE I, II, III и др.) или интенсивности рассеянной солнечной радиации (SAGE III, OSIRIS, SCIAMACHY и др.). Преимуществом зондирования в лимбе является возможность проводить большое число измерений над освещенной территорией планеты, однако их интерпретация затруднена ввиду зависимости рассеянного излучения от многих параметров атмосферы и подстилающей поверхности (ПП).

Несмотря на то, что одним из основных «мешающих» факторов при восстановлении газового и аэрозольного состава атмосферы являются облака, чувствительность алгоритмов решения обратных задач к характеристикам облачности исследована далеко не в полном объеме. Приближенные оценки неучета тропосферных облаков на точность вертикального распределения стратосферного озона (O_3) и диоксида азота (NO_2) с использованием процедур, реализованных применительно к измерениям OSIRIS, представлены в [1]. На основе замкнутых численных экспериментов получено описание влияния сплошной облачности на профиль O_3 , который восстанавливается согласно разработанной для SCIAMACHY методике [2, 3]. Авторы [2] показали, что ошибки восстановления концентраций O_3 максимальны в нижней стратосфере (6% при $h_p=15$ км) и становятся пренебрежимо малыми (<0,5%) на высотах более 40 км.

В отличие от выполненных ранее работ [2, 3 и др.], в настоящей статье представлены результаты статистического моделирования переноса солнечного излучения в сферической атмосфере для схемы лимбового зондирования с учетом эффектов стохастической геометрии жидкокапельных облаков (видимый диапазон). В данной работе описаны исследования влия-

ния 3D эффектов облаков на усредненную по ансамблю облачных реализаций интенсивность отраженной солнечной радиации при наклонных углах визирования (например, [4]).

МЕТОД РАСЧЕТА РАССЕЯННОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ СХЕМЫ ЛИМБОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В основе оригинального алгоритма расчетов солнечной радиации лежат процедуры, которые были разработаны нами ранее для моделирования спектральной яркости неоднородной облачности с учетом эффектов сферичности атмосферы для геометрической схемы зондирования, в которой линия визирования (ЛВ) пересекает поверхность Земли [4]. Моделирование спектрально-угловых характеристик восходящего излучения выполняется в отдельных реализациях пространственной неоднородной облачности (I) и усредненных по ансамблю облачных полей $\langle I \rangle$. В последнем случае используется подход, основанный на численном усреднении уравнения переноса излучения с использованием рандомизации и алгоритмов вычисления радиационных характеристик в отдельных облачных полях [4]. Для конструирования реализаций мезомасштабных облачных полей используется пуассоновская модель разорванной облачности; облака аппроксимируются опрокинутыми усеченными параболоидами вращения. Учет молекулярного поглощения реализован с использованием метода k -распределений.

Отметим некоторые нюансы, которые были приняты во внимание при разработке алгоритма для схемы лимбового зондирования.

Во-первых, при заданных условиях освещенности и наблюдения интенсивность отраженного излучения в разорванной облачности существенно зависит от конфигурации облаков [4]. Поскольку при интерпретации данных измерений такая информация практически всегда отсутствует, более целесообразным является, на наш взгляд, вычисление и анализ средней (по ансамблю облачных реализаций) интенсивности $\langle I \rangle$.

Во-вторых, несмотря на то, что использование рандомизации существенно сокращает затраты компьютерного времени, радиационные расчеты остаются достаточно трудоемкими, и возникает вопрос о целесообразности учета рефракции. Ошибки, характеризующие неучет преломления световых лучей в безоблачном небе, являются оценками сверху для погрешностей расчетов спектральной яркости в присутствии облаков – сплошных и разорванных, выполненных без учета рефракции. Результаты численных экспериментов с использованием реализованного нами алгоритма показали, что в видимой области спектра при невысоких значениях аэрозольной оптической толщины ($AOT(\lambda=0,55 \text{ мкм})=0,15$) величина погрешности в направлении «вперед» составляет $\sim 10\%$ для $h_p=1 \text{ км}$ и находится в пределах погрешности расчетов (1-2%) при $h_p=15 \text{ км}$, если зенитный и азимутальный углы Солнца равны соответственно $SZA=80^\circ$ и $SAA=0$.

Учитывая существенное увеличение трудоемкости расчетов радиационных характеристик с учетом рефракции, представленные ниже результаты моделирования в облаках получены с использованием алгоритмов, в которых преломлением солнечных лучей пренебрегалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим результаты расчетов интенсивности излучения в условиях безоблачного неба I_{clr} , в присутствии сплошных I_{cld} и разорванных $\langle I \rangle$ облаков при различных баллах облачности CF , изменении высоты линии перигея $0 \leq h_p \leq 15 \text{ км}$ и вариациях условий освещенности. Облачный слой занимает интервал 2–7 км; оптическая модель облачности соответствует модели кучевых облаков [база данных ОПАС, cumulus (continental, clean), $\lambda=0,55 \text{ мкм}$].

Прежде всего проанализируем изменения полей яркости излучения в диапазоне высот зондирования от ПП до верхней границы облаков (ВГО).

При наклонных углах Солнца зависимость $I_{\text{clд}}$ от высоты перигея качественно меняется с изменением азимутального угла Солнца. Так, при $SAA=15^\circ$ $I_{\text{clд}}(h_p)$ является убывающей (рис. 1,а), а при $SAA=175^\circ$ – возрастающей функцией h_p (рис. 1,в). При интерпретации полученных результатов будем иметь в виду, что формирование яркости в основном происходит в пределах облачного слоя на участках линии визирования $A_i B_i$, ($i=1, 2$, рис.1,б,д), длина которых сопоставима со средней длиной свободного пробега $l=1/\sigma$ (в наших экспериментах $l \sim 0,1$ км).

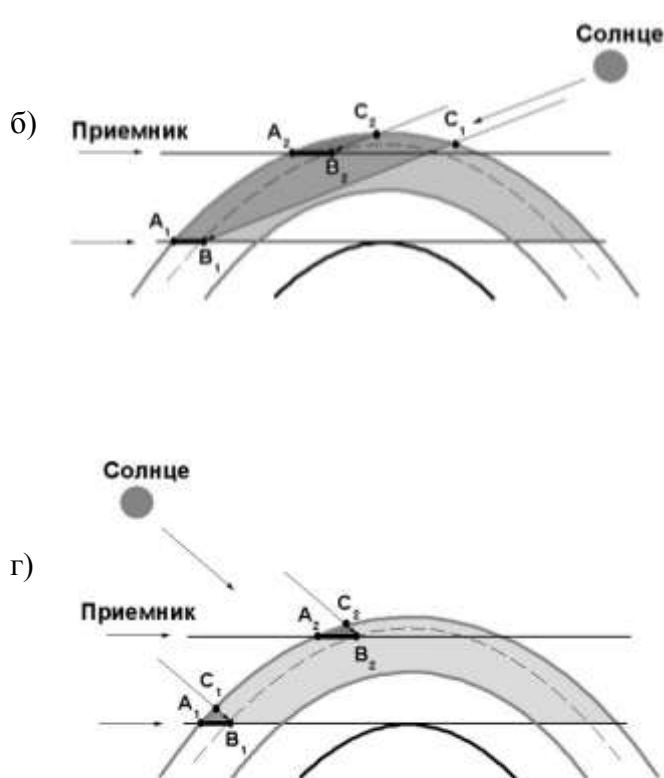
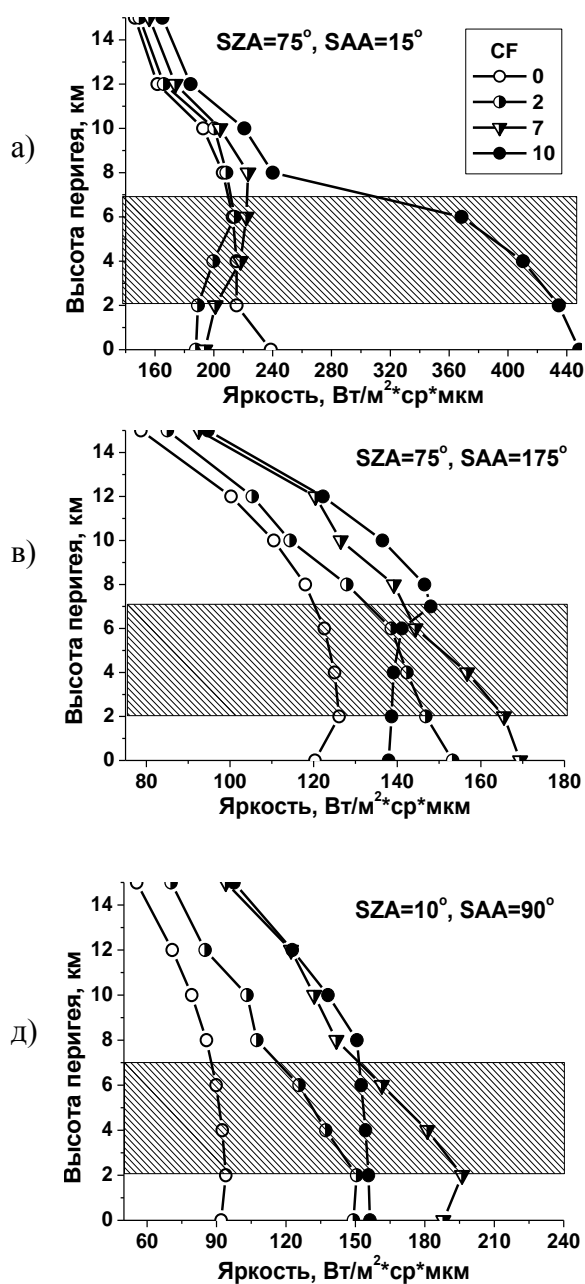


Рис. 1. Зависимость яркости неба от высоты линии перигея, условий освещенности и балла облачности (а, в, г); схематическое изображение участков сплошного облачного слоя, определяющих основной вклад в яркость неба для случаев, когда Солнце находится против (б) приёмника и за (д) приёмником. Коэффициент ослабления облаков $\sigma=10 \text{ км}^{-1}$; радиус основания облака равен 5 км; тип ПП – смешанный лес (альбеда $A_s=0,1$)

Основная часть излучения, достигшая участка A_iB_i , формируется в пределах облачного слоя, проекция которого на плоскость, проходящую через центр Земли, Солнце и приемник, схематично описывается криволинейным треугольником $A_iB_iC_i$, ($i=1, 2$, рис.1,б,д). Это излучение зависит от площади на ВГО (дуга A_iC_i), освещенной преимущественно прямыми солнечными лучами (увеличение I_{cld}), а также от совокупного ослабления радиации в направлении от ВГО до отрезка A_iB_i (уменьшение I_{cld}). В случае, когда Солнце и приемник расположены «друг против друга», площадь ВГО, которая в основном определяет достигшее участка ЛВ излучение, сокращается по мере возрастания высоты перигея, и $I_{\text{cld}}(h_p)$ убывает (рис. 1,а,б). Если Солнце находится «за приемником», освещенные Солнцем площади на ВГО сопоставимы, но ослабление излучения уменьшается по мере приближения ЛВ к ВГО (рис. 1,г). Вследствие этого имеет место увеличение I_{cld} с высотой линии перигея (рис. 1,в).

Результаты численных экспериментов показали, что интенсивность излучения на уровне $h_p=0$ не является монотонной функцией балла облачности.

Пусть $SZA=75^\circ$. Если $SAA=15^\circ$, то ввиду затенения линии визирования облаками имеет место неравенство $\langle I \rangle \leq I_{\text{clr}}$ (рис. 1,а). С изменением положения Солнца относительно приемника ($SAA=175^\circ$) знак неравенства меняется на противоположный $\langle I \rangle > I_{\text{clr}}$, поскольку в этой схеме облака выступают как отражатели. Более того, $\langle I \rangle$ превышает I_{cld} , поскольку при частичной облачности (по сравнению с сплошной) на уровне ПП увеличивается нисходящее диффузное излучение. При малых баллах облачности дополнительный вклад в освещенность ЛВ дает также нерассеянное излучение, прошедшее в просветах между облаками. (Более подробный анализ в [4].)

Для углов Солнца, близких к зениту, ($SZA=10^\circ$) и $h_p=0$, имеют место соотношения (рис. 1,д): $\langle I(CF=2) \rangle > I_{\text{clr}}$ – за счет увеличения (по отношению к безоблачному небу) числа рассеивателей; $\langle I(CF=7) \rangle > I_{\text{cld}}$ – ввиду приращения нисходящего диффузного излучения при частичной облачности.

На формирование $\langle I \rangle$ в слое разорванной облачности помимо усредненного воздействия 3D эффектов (облако пересекает/затеняет линию визирования; открыто/закрыто направление «на Солнце») влияет также радиационное взаимодействие – переотражение излучения между облачными элементами и их взаимное затенение. Это приводит к более сложным закономерностям изменения $\langle I \rangle$ с высотой зондирования. Примеры изменчивости $\langle I(h_p) \rangle$ для различных CF и условий освещенности приведены на рис. 1,а,в,г.

В заключение отметим, что, несмотря на сложные функциональные зависимости интенсивности излучения от уровня ПП до ВГО в различных атмосферных условиях, уходящее с верхней границы облаков излучение является монотонной функцией балла облачности и убывает с высотой перигея.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект АААА-А17-117021310142-5) при частичной поддержке РФФИ (грант №19-01-00351).

Список используемых источников

1. Retrieval of stratospheric O3 and NO2 profiles from Odin Optical Spectrograph and Infrared Imager System (OSIRIS) Limb-Scattered Sunlight Measurements / C.S. Haley, S.M. Brohede, C.E. Sioris et al. // J. Geophys. Res. – 2004. – Vol. 109, № D16303. – P. 1–19.
2. Cloud sensitivity studies for stratospheric and lower mesospheric ozone profile retrievals from measurements of limb-scattered solar radiation / T. Sonkaew, V.V. Rozanov, von Savigny C. et al. // Atmos. Meas. Tech. – 2009. – Vol. 2. – P. 653–678.

3. Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean Software package SCIATRAN / V.V. Rozanov, A.V. Rozanov, A.A. Kokhanovsky and J.P. Burrows // J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans. – 2014. – Vol. 133. – P. 13–71.

4. *Zhuravleva T., Nasrtdinov I.* Simulation of Bidirectional Reflectance in Broken Clouds: From Individual Realization to Averaging over an Ensemble of Cloud Fields // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, № 9. – Doi:10.3390/rs10091342.

Р.Л. Ахмедшин*,
С.В. Журавлев*,
кандидат физико-математических наук, доцент;
Н.Г. Котонаева*,
доктор физико-математических наук;
В.Т. Минлигареев*,
доктор технических наук, доцент;
А.Ю. Репин*,
доктор физико-математических наук, доцент;
С.В. Тасенко**,
кандидат технических наук;
В.В. Удриш ***

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

** Росгидромет, г. Москва.

*** Гидрометеорологическая служба ВС РФ, г. Москва.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ МОНИТОРИНГА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Показаны актуальность и структура информационного обеспечения ВС РФ и других заинтересованных ведомств Федеральным центром мониторинга геофизической обстановки, функционирующим на базе ФГБУ «ИПГ», находящегося в ведомстве Росгидромета.

Ключевые слова: мониторинг геофизической обстановки, базы данных, протокол передачи данных, зондирование ионосферы, информационная продукция

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время отмечается возрастание роли геофизического обеспечения Вооруженных сил в их повседневной деятельности, что является особенно актуальным в преддверии 25-го солнечного цикла (прогноз по пику цикла солнечной активности приходится на 2025–2027 годы). Влияние опасных гелиогеофизических явлений (ОГЯ) или космической погоды становится год от года все более значимым в силу бурного развития технических средств и систем, в том числе и военного назначения. Сведения о геофизических условиях необходимы для выбора параметров съемок из космоса, для коррекции систем навигации и наведения, для деятельности всех систем управления войсками.

Например, при ведении военных действий в зоне Персидского залива с 1990 по 2003 год (во время самого пика 23-го солнечного цикла) в интересах командования США и многонациональных сил во всех звеньях управления (тактического и стратегического уровня) активно использовались космические средства разведки, навигации, связи и предупреждения о ракетном нападении. В процессе исследований установлено, что сложность и неподготовленность театра военных действий по геофизическим параметрам влияли на эффективность выполнения задач космической разведки, связи, навигации. Исследования зарубежных источников свидетельствуют, что результат применения высокоточного оружия (ВТО) в зоне Персидского залива в первой кампании в значительной степени зависел от геофизических условий. Коэффициент эффективности применения составил 0,4–0,5 при планируемых 0,98. Гарантированное поражение цели в сложных метеоусловиях потребовало применения по цели не одной, а двух-трех крылатых ракет [1]. По сравнению с военной операцией «Буря в пу-

стыне» (1991), при проведении операции «Лис пустыни» (декабрь 1998 года), когда роль космических сил США стала более значимой, имелись очевидные свидетельства об учете ВС США геофизических факторов при эксплуатации своих космических систем военного и двойного назначения [1].

В Российской Федерации государственные функции оповещения об ОГЯ и состоянии космической погоды выполняет Федеральный центр мониторинга геофизической обстановки ФГБУ «ИПГ» (далее – ФИАЦ). Он обеспечивает федеральные органы исполнительной власти (в том числе и ВС РФ) текущей, прогнозной и экстренной информацией о геофизической обстановке, а также о выявленных фактах и об оценке последствий опасных природных явлений и антропогенного воздействия на атмосферу, ионосферу и околоземное космическое пространство, о степени опасности и о разработанных методах и средствах для минимизации ее последствий.

СХЕМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЦЕНТРА МОНИТОРИНГА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

В рамках осуществления основных задач ФИАЦ выполняет следующие мероприятия:

- сбор необходимой информации;
- формирование информационной продукции в подсистемах ФИАЦ. Под информационной продукцией понимается полученная в результате обработки сведений (данных) обобщенная информация о фактическом и прогнозируемом состояниях окружающей среды;
- предоставление информации потребителям в соответствии с протоколами информационного взаимодействия.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ФИАЦ

Основными источниками информационных ресурсов являются:

- региональные и тематические центры Росгидромета;
- космический сегмент;
- авиационный сегмент;
- наблюдательные сети Российской академии наук (РАН);
- наблюдательные сети других ведомств;
- официальные международные каналы обмена гидрометеорологической и гелиогеофизической информацией.

Региональные центры передают данные по магнитному полю и ионосфере, используя протокол передачи НТТР для оперативной оценки обстановки, а также протокол FTP для передачи файлов, содержащих цифровые данные.

Тематические центры обеспечивают возможность сбора и передачу данных геофизических наблюдений:

- зондирования ионосферы;
- уровня поглощения в ионосфере космического радиоизлучения;
- изменения вариации геомагнитного поля;
- воздействия мощных КВ сигналов радиоволн на ионосферу;
- ультрафиолетовой радиации на уровне Земли;
- параметров озонового слоя;
- параметров электрического поля ионосферы;
- грозопеленгации;
- СВЧ радиолокации;
- дистанционного измерения жидких осадков;

- лидарно-радарного зондирования атмосферы;
- регистрации СДВ и КВ сигналов;
- ракетного зондирования атмосферы;
- содержания малых газовых составляющих и аэрозоля в атмосфере.

Космический сегмент. Он базируется на двух космических комплексах – «Метеор-3М» и «Электра», в состав которых входят гелиогеофизические аппаратные комплексы ГГАК.

Применяемые технологии позволяют собирать полный массив данных на информационной шине ФИАЦ, полученных в оперативном режиме из всех доступных источников, а также использовать информационные ресурсы, находящиеся на ведомственной сети Росгидромета (рис. 1).



Рис. 1. Схема функционирования ФИАЦ

Информационная продукция ФИАЦ формируется на автоматизированных рабочих местах (далее – АРМ) операторов обработки и визуализации, так как на одном физическом АРМе могут располагаться несколько таких операторов, то далее такой АРМ будем называть подсистемой обработки информации. АРМы связаны с основной базой данных ФГБУ «ИПГ», а также с региональными и тематическими центрами. Программное обеспечение позволяет проводить проверку целостности и непротиворечивости информации, хранящейся в используемых в ФИАЦ базах данных. Потребителем задается состав передаваемых данных, форматы выдачи данных и способы передачи результирующей информации.

Подсистемы ФИАЦ. К ним относятся следующие:

- регистрация ионосферных возмущений «ISTORM»;
- прогноз состояния ионосферы «SIMP-2»;
- расчет радиотрасс;
- анализ томографических реконструкций радиотомографии;
- наукастинг появления геоэффективных потоков протонов;
- расчет доз радиации при авиаперелетах;
- анализ данных сети «Intermagnet»;
- визуализация данных по геопространственным полям Земли;
- блок обработки и визуализации данных региональных центров, УГМС Росгидромета.

Потребители информационной продукции ФИАЦ. Основными потребителями информационной продукции ФИАЦ являются:

- Министерство обороны РФ;
- Роскосмос;
- МЧС России;
- Министерство энергетики РФ;
- Министерство транспорта РФ.

ФИАЦ – это модульная структура (рис. 2), которая состоит из двух сегментов: сегмента, работающего в режиме постоянного мониторинга геофизической обстановки, и сегмента, работающего по запросу потребителей.

Сегмент, работающий в режиме постоянного мониторинга. Он служит для автоматического формирования, в заданные временные интервалы, пакетов, сформированных для передачи по компьютерным сетям, работающим по IP либо FTP протоколу. Пакеты могут содержать набор текстовых файлов либо файлов графических форматов, в зависимости от поставленной задачи. Для отправки пакетов потребителям ФИАЦ использует инфраструктуру передачи данных ФГБУ «ИПГ» и каналы связи Росгидромета.

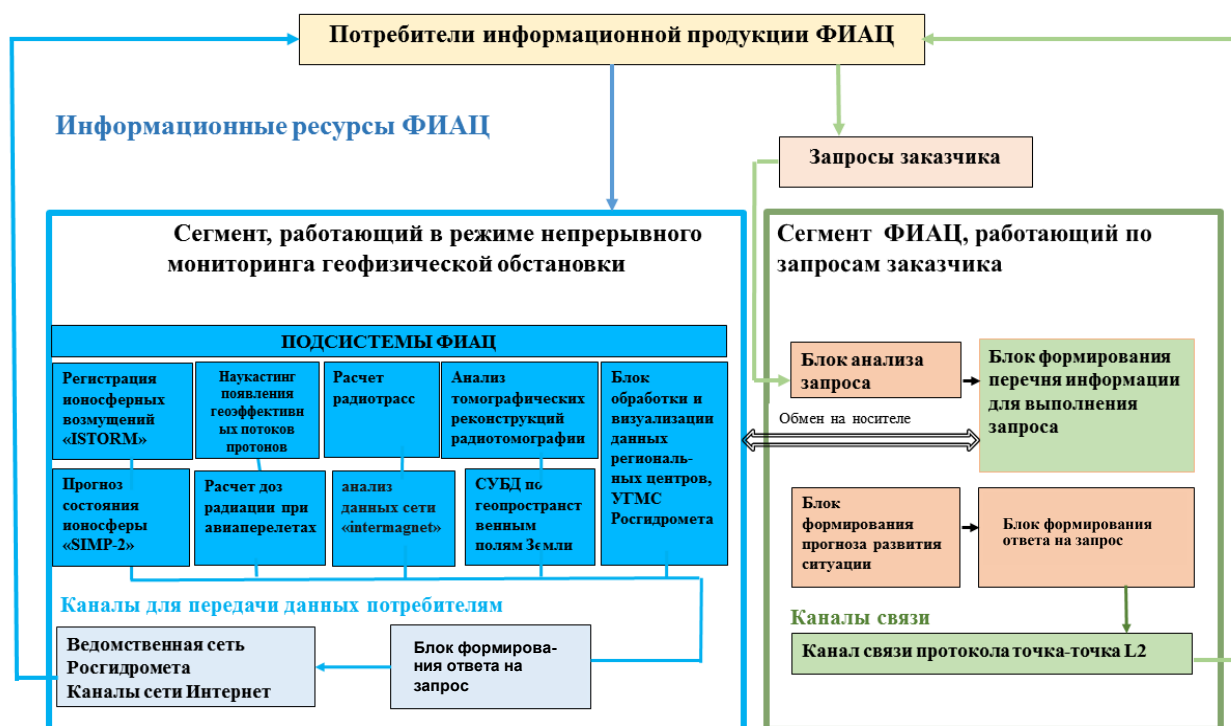


Рис. 2. Подсистемы ФИАЦ

СОСТАВ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЦЕНТРА МОНИТОРИНГА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

ФИАЦ состоит из следующих базовых компонентов [2]:

- центра для сбора, обработки и анализа информации, поступающей из открытых источников информации сети Росгидромета и региональных центров;
- центра принятия решений;
- внутренней компьютерной сети, позволяющей соединить центр принятия решений с помещениями персонала специализированных узлов связи;

– абонентского пункта узла специальной связи для приема и передачи специальных сообщений по выделенному каналу.

В ФИАЦ созданы рабочие места операторов для приема, обработки и визуализации информации, поступающей из центров, созданных на базе ФГБУ «ЦАО», ФГБУ «ГГО», ФГБУ «Тайфун» и ФГБУ «ААНИИ». Также обеспечен доступ для получения и визуализации оперативных данных, находящихся в системе хранения данных ФГБУ «ИПГ» и на порталах ФГБУ «Дальневосточное УГМС», «Мурманское УГМС» и «Западно-Сибирское УГМС». Разработана система вывода информации на унифицированной платформе геоинформационной системы ArcGIS™.

Программное обеспечение позволяет проводить проверку целостности и непротиворечивости информации, хранящейся в базе данных, а также обеспечивает возможность модификации базы данных и наращивания ее функционала в случае необходимости.

Центр оборудован средствами обработки, хранения и визуализации информации, а также подготовки ее к отправке в специальном формате по внутренней сети программно-технического комплекса геофизического мониторинга (ПТК ГФМ) непосредственно на приемно-передающую аппаратуру специализированных узлов связи.

РЕАЛИЗАЦИЯ КАНАЛА СВЯЗИ ФИАЦ С ГМС ВС РФ

В настоящий момент проведены работы по переносу процесса передачи информации с ведомственной сети Росгидромета на специальный канал связи, подключающий ФИАЦ ФГБУ «ИПГ» через узел связи компании ПАО «Ростелеком» к пункту связи ГМС ВС РФ. Тестирование канала завершено. Физический канал связи ФИАЦ с узлом связи ГМС ВС РФ арендуются у провайдера «Ростелеком».

Канал связи реализован с помощью технологии соединения точка-точка, которая обозначается аббревиатурой PPP (*Point-to-Point Protocol*). Технология обеспечивает единственную связь от клиентского компьютера к физически удаленному компьютеру, находящемуся в отдаленной сети. PPP обеспечивает стандартный метод взаимодействия двух узлов сети. Предполагается, что обеспечивается двунаправленная одновременная передача данных. Общая схема функционирования канала связи представлена на рис. 3.

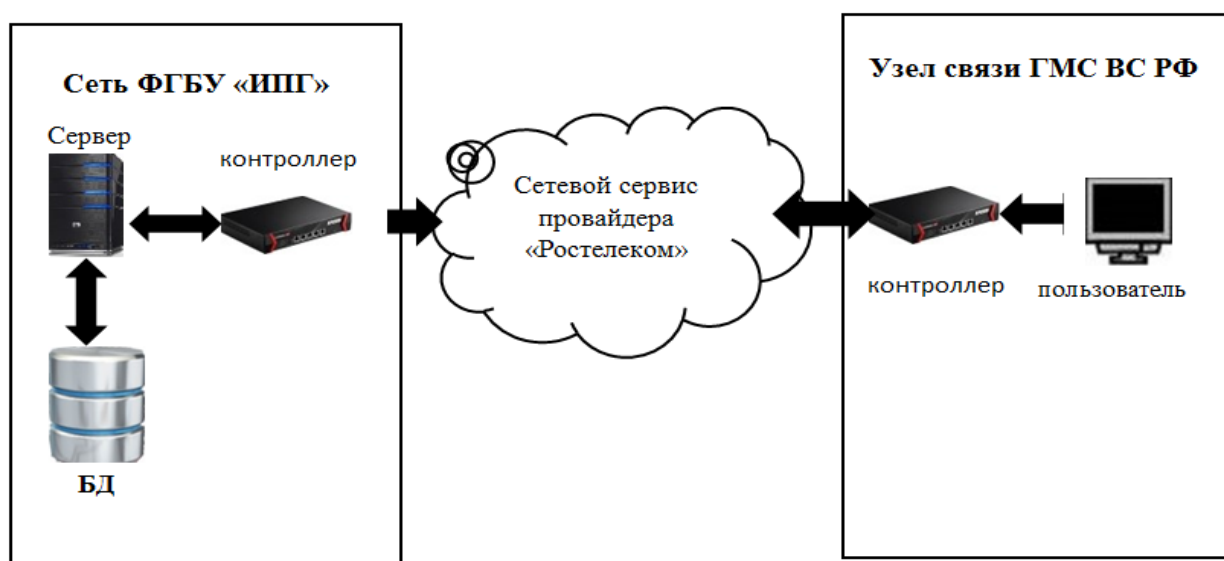


Рис. 3. Канал связи ФИАЦ ФГБУ «ИПГ» с ГМС ВС РФ

Для соединения точка-точка, провайдер выделил канал пропускной с способностью 2Мб/сек, при этом использовалась технология мультиплексирования в пределах сети. Передача передаваемой информационной продукции находится в стадии согласования.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

Существенную часть геофизической информации, поставляемой в ГМС ВС РФ, составляют сведения мониторинга ионосферы и распространения радиоволн. Основным источником ионосферных данных по Российской Федерации являются ионозонды двух институтов Росгидромета – сеть ионозондов «Парус», поддерживаемая ФГБУ «ИПП», и сеть ионозондов CADI, поддерживаемая Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом Росгидромета.

Также данные предоставляются такими институтами Российской академии наук, как Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук (ИЗМИРАН) и Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (ИСЗФ СО РАН).

Важнейшим источником информации является международный обмен данными. Между Росгидрометом и Университетом Массачусетса (США) заключен меморандум о взаимопонимании, по которому ионосферные данные 10 станций сети ФГБУ «ИПП» поставляются в глобальную международную базу данных GIRO в Центре атмосферных исследований Университета Массачусетса (UML CAR). В свою очередь, ФГБУ «ИПП» получает оперативный доступ к данным более чем 70 ионозондов по всему миру. Большая часть из них – это диги-зонды различных моделей.

Кроме того, ионосферные данные поступают из открытых источников сети интернет. В качестве резервного источника данных используются сервера открытого доступа, например сервер Центра космической погоды (SWPC) в Боулдере (США). Недостатком этих серверов является неполная информация и большие, до получаса, задержки в получении данных.

Кроме результатов обработки ионограмм в центральной базе данных ФГБУ «ИПП» содержатся и непрерывно обновляются следующие индексы геомагнитной, солнечной и ионосферной активности:

- месячный глобальный ионосферный индекс IG, необходимый для работы ионосферной модели IRI [2];
- месячный глобальный ионосферный индекс T [3], используемый ионосферной моделью SIMP;
- суточные, месячные и усредненные по 12 месяцам значения потока солнечного радиоизлучения F10.7, а также его прогноз на 3 дня;
- месячные и усредненные по 12 месяцам значения солнечного индекса Rz;
- трехчасовые, суточные, месячные и усредненные по 12 месяцам значения планетарного индекса магнитной активности Ap, а также его прогноз на 3 дня.

ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ИНФОРМАЦИОННОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ МЕЖДУ ФИАЦ И ГМС ВС РФ

Взаимодействие Росгидромета и ГМС ВС в вопросе по обеспечению геофизической информацией определяется апробируемым в настоящий момент Положением по информационному взаимодействию между ФИАЦ и ГМС ВС РФ. Ранее предоставление информации осуществлялось на основе протоколов информационного взаимодействия с различными ведомствами. В Положении определяется состав информационной продукции, передаваемой

ФИАЦ, а также порядок ее передачи на узлы связи ГМС ВС РФ. В протокол добавлен раздел по схеме получения разовых запросов, получаемых ФИАЦ через сервера электронной почты ведомственной сети Росгидромета. Протокол отработан в тестовом режиме в подразделениях ГМС видов Вооруженных сил и военных округов.

Остановимся на ионосферном сегменте этого взаимодействия. В основе ионосферного мониторинга лежит модель SIMP-2 [3], обеспечивающая определение краткосрочного прогноза и оперативное состояние ионосферы. В модель ассимилируются данные ионозондов вертикального радиозондирования, поступающие в базу данных ФГБУ «ИПГ». Эта модель дает информацию о таких ионосферных параметрах, как критические частоты слоев F2, F1 и E (foF2, foF1, foE) и высота максимума слоя F2 (hmF2). Ежечасно получаемая ГМС ВС РФ ионосферная информация включает в себя следующие файлы графического формата jpg:

- прогноз параметров foF2;
- карту критической частоты слоя E (foE);
- карту скорректированной критической частоты слоя F2 (foF2);
- график профиля электронной концентрации.

Для передачи цифровой информации разработана специальная методика передачи по протоколу «IONMODEL». Протокол «IONMODEL» используется для передачи результатов работы ионосферных моделей. Он является текстовым файлом, состоит из строк текстовых символов в кодировке ASCII.

Информация о параметрах КВ-радиотрасс поставляется в ГМС ВС РФ в режиме «по запросу» с использованием вычислительного комплекса QRG, предназначенного для расчета распространения коротких радиоволн с учетом состояния ионосферы. Комплекс QRG позволяет, в частности, прогнозировать максимальную и оптимальную рабочие частоты (МПЧ и ОРЧ) и наименьшую рабочую частоту (НПЧ) для заданных трасс, включая построение графиков суточного хода МПЧ, ОРЧ, НПЧ. При этом используется пространственно-временное распределение электронной концентрации регулярных слоев ионосферы на основе модели SIMP-2 (ИПГ) и международной справочной модели (IRI-2016), с ассимиляцией данных ионосферных измерений по всему миру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системе мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации ФИАЦ выполняет важную роль в консолидации данных, получаемых из различных источников, в их обработке и анализе. Подсистемы ФИАЦ используют индивидуальную и гибкую структуру для работы с данными с возможностью ручной настройки параметров и формата данных. Системы связи ФИАЦ позволяют оперативно передавать данные анализа и прогноза развития ситуации в круглосуточном режиме.

Росгидромет через ФИАЦ ежечасно осуществляет геофизическое обеспечение ГМС ВС РФ с использованием созданных в ФГБУ «ИПГ» технологий мониторинга геофизической обстановки. Для передачи информации создан специальный выделенный канал, физически арендуемый у провайдера «Ростелеком», организованный по принципу точка-точка. Состав передаваемой информации определен специальными протоколами взаимодействия и включает в себя, в частности, данные системы ионосферного мониторинга и прогноза, функционирующей в ФГБУ «ИПГ».

Развитие ФИАЦ предполагается по различным направлениям: кардинальное обновление аппаратной части с переходом на импортозамещающие технологии, введение новых кластеров. Например, ведутся разработки модуля кластера ФИАЦ как части федерального портала пространственных данных, раздела «Ведомственные данные» с базами данных по пространственным данным геофизических полей для перспективных систем автономной навигации – корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС) [4].

Список используемых источников

1. Копылов А.И., Пивоваров Ю.Ф. Влияние естественных факторов на эффективность применения космических систем США в ходе военных действий в зоне Персидского залива (1990–2003) // Военная мысль. – 2018. – № 3. – С. 68–78.
2. Ахмедшин Р.Л., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г. Федеральный центр мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации // Гелиогеофизические исследования. – 2019 – Вып. 23. – С. 23–33.
3. Сервис долгосрочного и оперативного прогноза условий распространения радиоволн КВ диапазона / А.Ю. Репин, М.М. Анишин, Б.Г. Барабашов и др. // Труды конференции РРВ-26, 1–6 июля 2019 г., Казань. – С. 75–82.
4. Картографическое обеспечение магнитометрических навигационных систем робототехнических комплексов / В.Т. Минлигареев, А.В. Алексеева, Ю.М. Качановский и др. // Известия ЮФУ. Технические науки. Тем. вып.: Перспективные системы и задачи управления. – Ростов-на-Дону, 2019. – № 1 (203). – С. 248–258.

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

* Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик.

** Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный.

*** Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ СВЕДЕНИЙ О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Обсуждается возможность использования в качестве полигонов для мониторинга стабильности отклика оптической аппаратуры спутникового базирования покрытых снегом территорий, расположенных в широтном поясе, доступном наблюдениям с обитаемых космических аппаратов. Приведены результаты тестирования различных базисов для описания сезонной изменчивости толщины снежного покрова. Предложены алгоритм моделирования, исключающий выход модельных значений за физически осмысленные границы динамического диапазона моделируемого процесса, а также рекомендации по оптимальному алгоритму построения аналитического описания этой изменчивости. Представлены результаты визуализации географического распределения параметров спектра сезонной изменчивости для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

Ключевые слова: калибровка спутниковой оптической аппаратуры, мониторинг чувствительности спутниковой оптической аппаратуры, полигоны, снежное покрытие, сезонная и долговременная изменчивость снежного покрытия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вопросы мониторинга стабильности отклика оптической аппаратуры спутникового базирования чрезвычайно важны не только для контроля надежности абсолютных измерений с борта КА, но и для обеспечения надежности интерпретации данных спектральных измерений, так как изменения чувствительности оптической приемной аппаратуры имеют выраженную дисперсию по длинам волн. Если для космических аппаратов (КА), функционирующих на полярных и близких к ним орбитах, полигоны для калибровки такой аппаратуры доступны практически на каждом витке, то для обитаемых КА, с борта которых осуществляются наиболее тонкие и сложные измерения, требующие участия экипажа, вопросы калибровки стоят гораздо более остро. Естественно использовать, если не для калибровки, то хотя бы для мониторинга долговременной стабильности чувствительности оптической и микроволновой спутниковой аппаратуры, отражение от поверхности свежевыпавшего снега и опираться при этом на сезонную изменчивость толщины снегового покрытия. Эта толщина тесно связана с альбедо заснеженной поверхности (по мере таяния снегового покрытия его альбедо падает), а кроме того, планирование калибровочных измерений целесообразно проводить в периоды наибольшей скорости увеличения толщины снежного покрытия, когда заснеженная поверхность не загрязнена и имеет значения альбедо, близкие к 100%. Первая попытка получить аналитическое описание сезонной изменчивости толщины снежного покрытия (ТСП), необходимого для заблаговременного планирования

калибровочных измерений, была предпринята нами в работе [1], но предложенный в ней алгоритм нуждается в усовершенствовании. Дело в том, что построение сезонной изменчивости, выполненное на основе регрессионного моделирования с использованием в качестве регрессоров гармоник периода заснеженности, дает для отдельных периодов и регионов отрицательные значения ТСП.

Таблица 1

Нефизичные значения гармонических регрессионных моделей [1]

Станция	Долгота	Широта	Высота	Число отрицательных значений	Наименьшее значение модели, см	Число значений, меньших 1/8 см
Ахты	47.44	41.28	1054	0	0.12	0
Буйнакск	47.47	42.492	560	0	0.01	0
Владикавказ	44.4	43.21	680	0	0.14	0
Грозный	45.7	43.32	130	1	-0.06	0
Дербент	48.17	42.04	30	6	-0.05	0
Изберг	47.45	42.34	21	7	-0.13	1
Изобильный	41.72	45.22	194	0	0.02	0
Каменноостровский	43.05	43.73	866	0	0.04	0
Кизляр	46.43	43.51	-17	0	0.00	0
Кисловодск	42.43	43.54	819	0	0.10	0
Краснодар	38.98	45.03	26	1	-0.002	0
Майкоп	40.05	44.37	270	1	-0.01	0
Махачкала	47.31	42.59	173	2	-0.09	0
Нальчик	43.6	43.5	425	0	0.04	0
Прохладный	44.05	43.46	198	2	-0.04	0
Ростов-на-Дону	39.82	47.25	77	1	-0.044	0
Сочи	39.73	43.45	57	0	0.016	0
Ставрополь	41.02	45.05	473	0	0.05	0
Теберда	41.73	43.45	1280	0	0.23	0
Тырнауз	42.93	43.4	1300	2	-0.03	0
Черкесск	42.04	44.17	526	0	0.06	0

Хотя, как видно из табл. 1, указанные отрицательные значения по абсолютной величине гораздо меньше погрешности исходных (т. е. выполняемых на гидрометеорологической сети) измерений (0,5 см). Нельзя исключить, что это обстоятельство обусловлено относительной малостью динамического диапазона ТСП для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, на территории которых строилась модель в работе [1]. Ясно, что, например, в азиатской части РФ в том же широтном поясе динамический диапазон ТСП будет значительно больше, что приведет к возрастанию количества нефизичных значений и их величин.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ АЛГОРИТМ РЕГРЕССИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы заведомо исключить возможность получения отрицательных значений модели сезонного хода, был предложен следующий алгоритм ее построения:

– регрессионное моделирование рядов логарифмов отсчетов с использованием базиса полиномов Чебышева (порядка от 0 до 6, чтобы сохранить число степеней свободы в модели на уровне [1]) как I (Т) рода, так и II (U) рода [2];

– построение в качестве первого приближения модели экспоненты от полученных полиномов;

– уточнение значений коэффициентов полиномов с помощью встроенного метода рабочего листа электронных таблиц Excel [3] Solver (в русском интерфейсе «Поиск решения») [4].

Описанный выше алгоритм тестировался на исходных данных [1]. Прежде всего отметим, что эффективность (коэффициент детерминации [5]) уже на втором шаге оказалась существенно выше для полиномов Чебышева II рода. Для Т-полиномов коэффициент детерминации, осредненный по всем станциям, составил $88 \pm 4\%$, а для U-полиномов – $94 \pm 3\%$. После уточнения значений коэффициентов полиномов коэффициенты детерминации получились практически не уступающими таковым для гармонических моделей, а именно для полиномиальных $98.1 \pm 1.9\%$, а для гармонических $98.7 \pm 1.8\%$ для всего множества из 21 станции, что видно на рис. 1, на котором представлены графики исходных данных и моделей сезонного хода ТСП на станции Изберг.

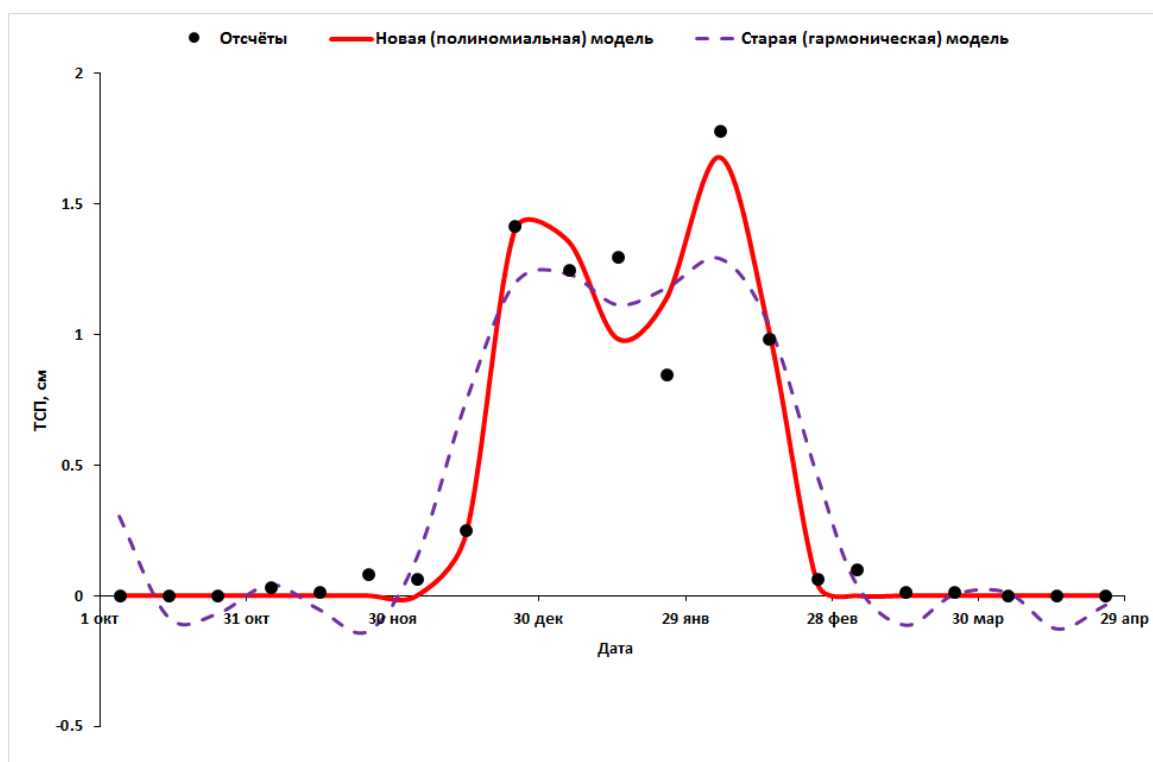


Рис. 1. Исходные данные и модели сезонного хода для станции Изберг

Видно, что новая (полиномиальная) модель сезонного хода отрицательных значений, в отличие от старой модели, не имеет. Для каждой станции в рамках новой (полиномиальной) модели был вычислен энергетический центр тяжести ЭЦТ ее чебышевского спектра:

$$\nu = \frac{\sum_{n=1}^6 n a_n^2}{\sum_{n=1}^6 a_n^2}.$$

Как и следовало ожидать, для всех станций величина ν оказалась близка к 2, что свидетельствует о близости самого грубого приближения сезонного хода к квадратичной параболе. Географическое распределение отклонения значения ЭЦТ от 2 показано на рис. 2.

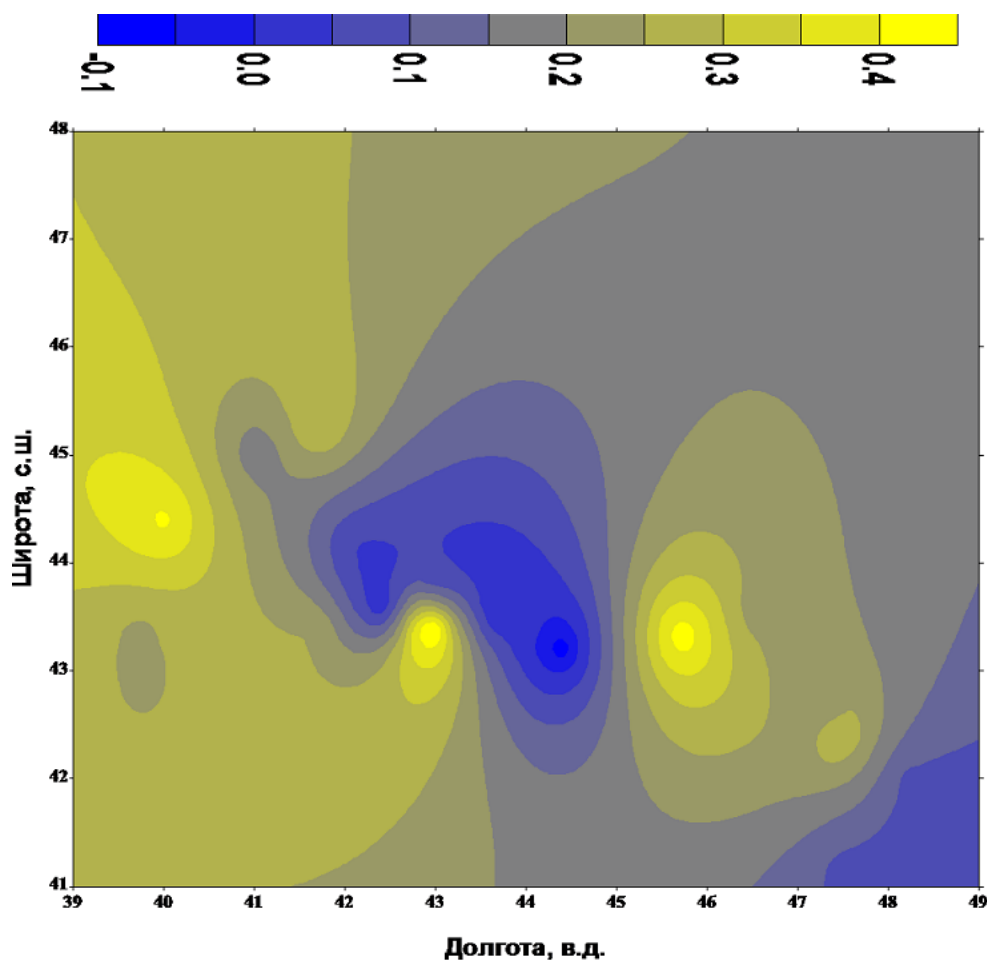


Рис. 2. Географическое распределение отклонений ЭЦТ чебышевского спектра от 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и успешно тестирован алгоритм построения модели сезонной изменчивости ТСП. Этот алгоритм исключает появление нефизичных (отрицательных) значений модели, обеспечивает ее высокий коэффициент детерминации (свыше 98%) и позволяет успешно применять модель для заблаговременного планирования калибровочных измерений оптической аппаратуры космического базирования.

Список используемых источников

1. Моделирование сезонной и долговременной изменчивости снежного покрова Южного федерального округа России / Б.А. Ашабоков, Л.А. Кешева, Г.М. Крученицкий, А.А. Ташилова, Р.А. Шокуев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – № 662. – С. 22–25.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1974. – С. 776–777.
3. Рудникова Л.В. Microsoft Office Excel 2016 в подлиннике. – СПб.: БВХ-Петербург, 2017. – 615 с.
4. Walkenbach J. Excel 2013 Power Programming with VBA. – Wiley, 2013. – 754 p.
5. Хадсон Д. Статистика для физиков. – М.: Мир, 1970. – С. 206–216.

Н.Ф. Благовещенская*,
доктор физико-математических наук;

Т.Д. Борисова*,
кандидат физико-математических наук;

А.С. Калишин*,
кандидат технических наук

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

ЭФФЕКТ МАГНИТНОГО ЗЕНИТА ПРИ МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Представлены результаты экспериментального исследования зависимости интенсивности искусственных ионосферных возмущений в высокоширотной F-области ионосферы от угла излучения в вертикальной плоскости мощной КВ радиоволны необыкновенной (Х-мода) поляризации. Установлено, что наиболее интенсивные возмущения наблюдаются при излучении мощной КВ радиоволны в направлении магнитного поля Земли (магнитный зенит).

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, мощная КВ радиоволна, поляризация, магнитный зенит, радар некогерентного рассеяния радиоволн.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты экспериментов по воздействию мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) поляризации на ионосферу убедительно свидетельствуют о том, что интенсивность искусственных возмущений в F-области ионосферы (искусственные ионосферные неоднородности различных пространственных масштабов, аномальное ослабление, искусственное свечение, нагрев ионосферной плазмы и т. д.) существенно зависит от направления излучения мощной КВ радиоволны.

В соответствии с теоретическими [1] и экспериментальными результатами [2] мощная КВ радиоволна О-поляризации, вследствие нелинейной самофокусировки, может захватываться каналом и распространяться вдоль магнитного поля Земли. Наиболее сильные возмущения в ионосферной плазме возникают именно вдоль направления магнитного поля. Это и есть эффект магнитного зенита. Он в максимальной степени выражен в высоких широтах и ослабевает с уменьшением широты, на которой расположен КВ нагревной комплекс.

Результаты, полученные специалистами ААНИИ в ходе многочисленных экспериментов на технических средствах Европейской научной ассоциации EISCAT, убедительно показали, что мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации может приводить к генерации разнообразных возмущений в F-области высокоширотной ионосферы [3–5].

Целью данной работы является исследование параметров искусственных ионосферных возмущений, обусловленных воздействием мощных КВ радиоволн Х-поляризации на высокоширотную F-область ионосферы при различных углах излучения мощных КВ радиоволн, включая вертикальное, вдоль магнитного поля и промежуточное между ними направления. Предполагается также выполнить сравнение проявлений эффекта магнитного зенита при нагреве высокоширотной ионосферы мощной КВ радиоволной О- и Х-поляризации.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Модификация высокоширотной ионосферы осуществлялась с помощью КВ нагревного комплекса EISCAT/Heating, расположенного в г. Тромсе, Норвегия (69.6° N, 19.2° E) [6]. Эксперименты выполнялись с 2011 по 2016 год. Мощная КВ радиоволна излучалась на фиксированных частотах в диапазоне от 5,4 до 7,9 МГц на фазированные антенные решетки (ФАР) 1 и 3. ФАР 1 имела ширину главного лепестка диаграммы 5-6° и обеспечивала максимальную эффективную мощность излучения порядка $P_{\text{эфф}} = 550 \div 1100$ МВт в зависимости от частоты нагрева. ФАР 3 с шириной главного лепестка порядка 12° обеспечивала максимальную эффективную мощность излучения $P_{\text{эфф}} = 160 \div 280$ МВт. В период экспериментов излучение мощной КВ радиоволны проводилось в вертикальном направлении (HF 90°), вдоль магнитного поля (HF 78°) и промежуточном между ними направлении (HF 84 или 86°) циклами 10 мин – нагрев, 5 мин – пауза.

Диагностика эффектов воздействия осуществлялась с помощью радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц, расположенного в непосредственной близости (порядка 200 м) от нагревного комплекса EISCAT/Heating. EISCAT радар НР на частоте 930 МГц позволял определять параметры ионосферной плазмы (электронная плотность и температура, Ne и Te) в диапазоне высот от 80 до 800 км, а также контролировать возбуждение искусственной ионосферной турбулентности [ленгмюровской (L) и ионно-акустической, (IA)] и определять их характеристики. Далее, L и IA турбулентность проявлялась непосредственно в спектрах сигнала радара НР в виде усиленных нагревом плазменных и ионных линий. Радар НР работал в режиме сканирования искусственно возмущенной области (ИВО). В этом случае в течение длительности цикла нагрева осуществлялось ступенчатое изменение углов возвышения радара $\Theta_{\text{УHF}}$ от 74 до 90°. Длительность каждой ступени составляла 1 или 2 мин. При этом от ступени к ступени угол возвышения радара НР изменялся на 1 или 2°.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования эффекта магнитного зенита была выполнена серия специальных измерений на радаре некогерентного рассеяния радиоволн по детальному исследованию пространственной (в поперечном к магнитному полю направлении) структуры искусственно возмущенной области ионосферы при О- и Х-поляризации мощной КВ радиоволны. На рис. 1 представлены данные измерений радара некогерентного рассеяния в Тромсе в период эксперимента 21 октября 2012 года с 14 до 15 UT при альтернативном О/Х-нагреве высокоширотной F-области ионосферы на частоте 7,953 МГц циклами 10 мин – нагрев, 5 мин – пауза. В циклах 14:01–14:11 и 14:16–14:26 UT мощная радиоволна излучалась в вертикальном направлении (90°), а в циклах 14:31–14:41 и 14:46–14:56 UT – в магнитный зенит (78°). Эффективная мощность излучения составляла 650 МВт. Частота нагрева была ниже критической частоты слоя F2 ($f_H / f_oF2 = 0,9 \div 0,93$). Радар некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсе измерял мощность инициированных нагревом плазменных линий и мощность обратно рассеянного сигнала радара («сырые» значения электронной концентрации), являющихся проявлением усиленных нагревом ионных линий. Возникновение усиленных нагревом плазменных и ионных линий – это прямое указание на возбуждение параметрической распадной неустойчивости (parametric decay instability, PDI), когда мощная электромагнитная волна распадается на продольные плазменные волны (ленгмюровскую и ионно-акустическую). В течение циклов нагрева радар некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсе работал в режиме ступенчатого изменения углов возвышения $\Theta_{\text{УHF}}$ в последовательности 74 - 76 - 77 - 78 - 79 - 81 - 83 - 85 - 87 - 90° (1 мин при каждом угле).

Из анализа рис. 1 следует, что при Х-нагреве появление интенсивных плазменных и ионных линий происходило только при излучении мощной Х-волны в магнитный зенит (HF

78°), в то время как при вертикальном излучении (HF 90°) волны накачки возбуждение искусственной ионосферной турбулентности не наблюдалось. Следует также отметить, что по данным измерений радара HP возрастание электронной концентрации (создание каналов повышенных значений N_e в широком диапазоне высот) происходило только при X-нагреве в магнитный зенит. При O-нагреве искусственные возмущения в F-области ионосферы создавались как при вертикальном излучении мощной КВ радиоволны, так и при ее излучении в магнитный зенит. Тем не менее максимальные возрастания температуры электронов происходили при излучении волны накачки вдоль направления магнитного поля.

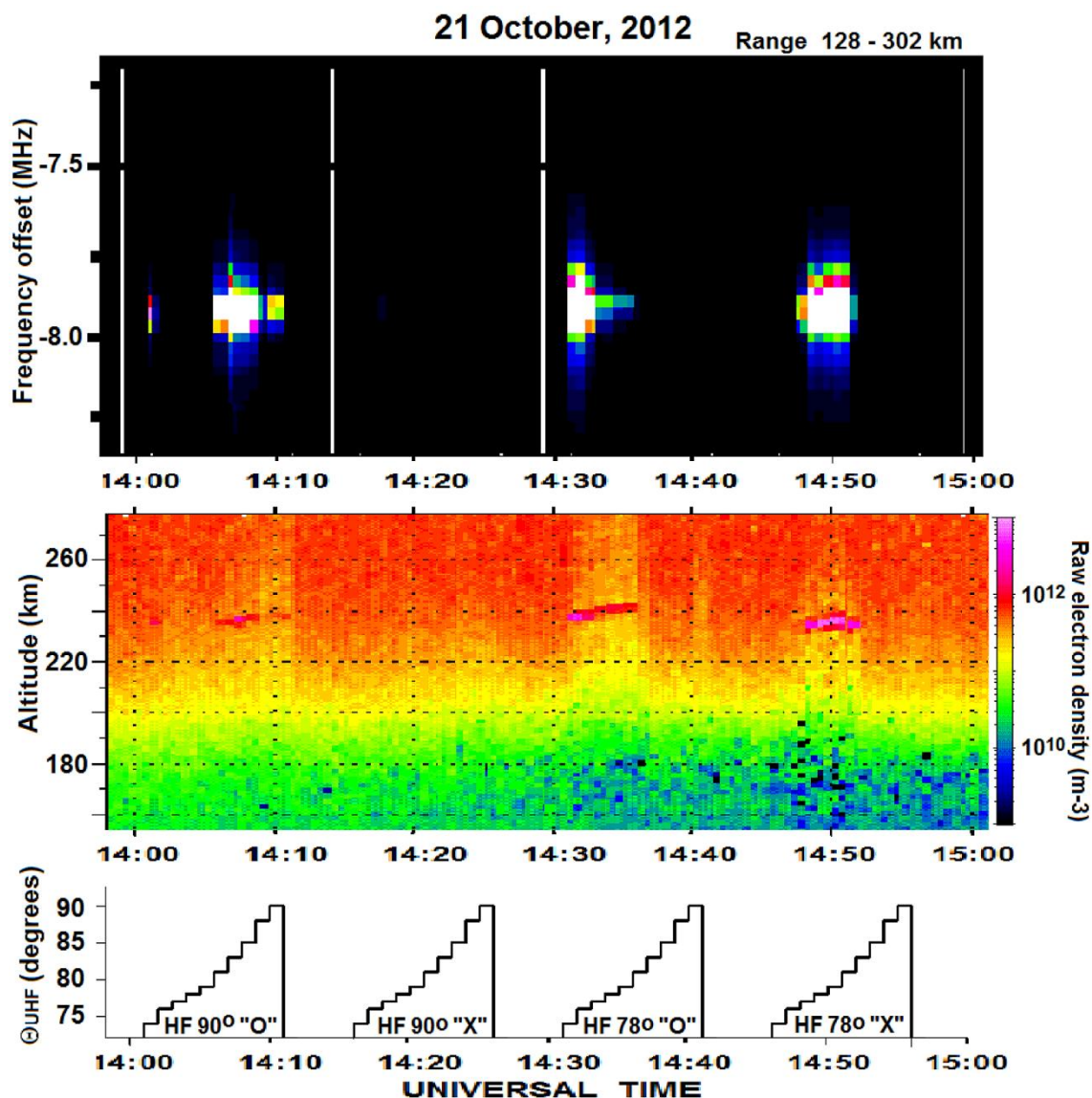


Рис. 1. Данные наблюдений радара некогерентного рассеяния EISCAT при сканировании искусственно возмущенной области ионосферы по углам возвышения от 74 до 90° в период эксперимента 21 октября 2012 года. Мощная КВ радиоволна O/X-поляризации излучалась на ФАР 1 на частоте 7,953 МГц в направлениях 90 и 78°. Поляризация и направление излучения мощной КВ радиоволны, а также схема изменения углов радара HP показаны на нижней панели

Было интересно сравнить пространственный размер ИВО, в которой возбуждались интенсивные плазменные и ионные линии, при излучении мощной X-волны на ФАР 1 (с узкой

диаграммой направленности, порядка $5\text{--}6^\circ$) и на ФАР 3 (с шириной диаграммы 12°). На рис. 2 приведены данные измерений радара НР в Тромсе в период эксперимента 21 октября 2013 года с 15 до 16 UT при X-нагреве на частоте 7,1 МГц циклами 10 мин – нагрев, 5 мин – пауза. В циклах нагрева 15:01–15:11 и 15:16–15:26 UT мощная КВ радиоволна излучалась на ФАР 1 ($P_{\text{эфф}} = 780$ МВт) в магнитный зенит (78°) и в направлении 86° соответственно. В циклах 15:31–15:41 и 15:46–15:56 UT волна накачки излучалась на ФАР 3 ($P_{\text{эфф}} = 195$ МВт) в тех же направлениях излучения, что и на ФАР 1 (78 и 86°). Аналогично событию 21 октября 2012-го (рис. 1) радар НР 21 октября 2013 года (см. рис. 2) также измерял мощность инициированных нагревом плазменных линий и мощность обратно рассеянного сигнала радара («сырые» значения электронной концентрации), являющихся проявлением усиленных нагревом ионных линий. Частота нагрева в период эксперимента превышала критическую частоту слоя F2 на $0,1\text{--}0,6$ МГц. В течение циклов нагрева радар НР работал в режиме ступенчатого изменения углов возвышения в последовательности $76\text{--}77\text{--}78\text{--}79\text{--}80^\circ$ (2 мин при каждом угле).

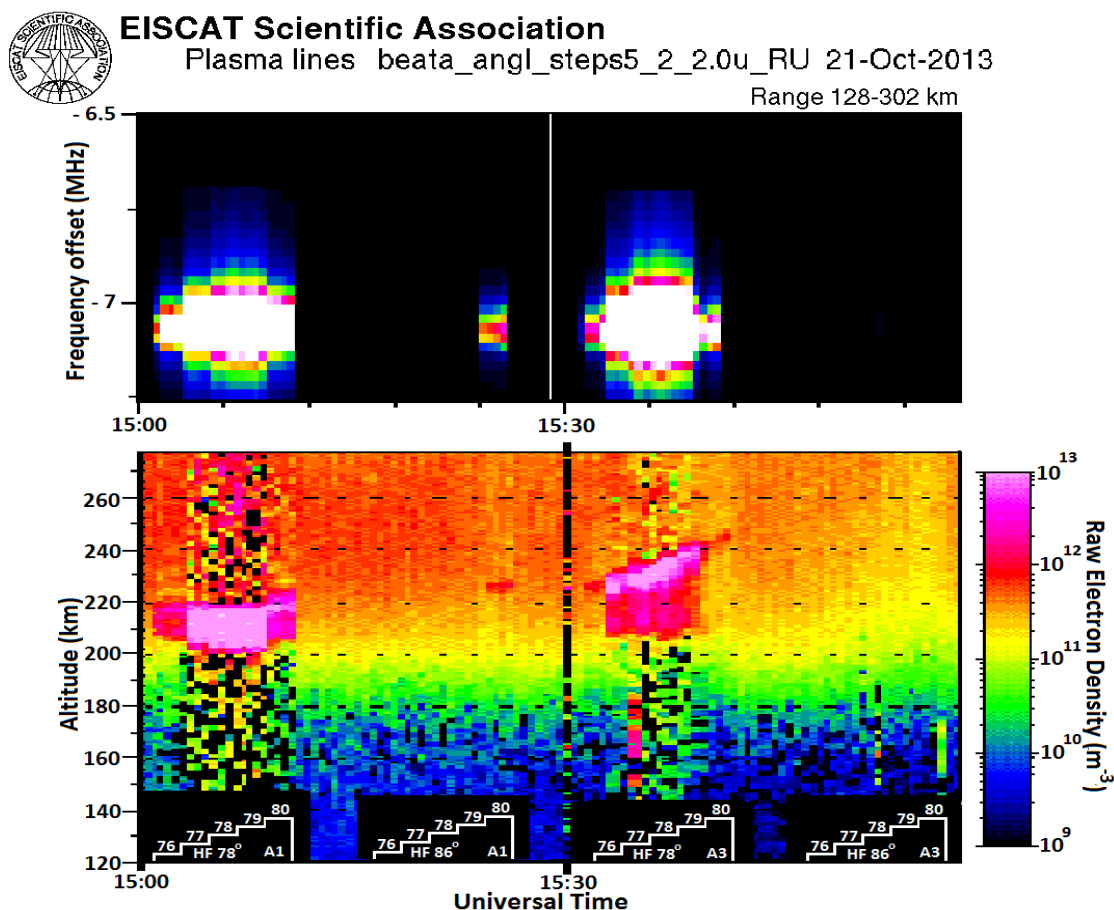


Рис. 2. Данные наблюдений радара некогерентного рассеяния EISCAT при сканировании искусственно возмущенной области ионосферы по углам возвышения от 76 до 80° в период эксперимента 21 октября 2013 года. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на ФАР 1 и ФАР 3 на частоте 7,1 МГц в направлении 78 и 86° . Направление излучения мощной КВ радиоволны и тип используемой ФАР, а также схема изменения углов радара НР показаны на оси времени

Анализ данных, представленных на рис. 2, показал, что при X-нагреве на частотах выше foF2, аналогично экспериментам на частотах нагрева ниже foF2, максимальные интенсивности усиленных нагревом плазменных и ионных линий регистрировались при излучении вол-

ны накачки в магнитный зенит. Важно отметить, что максимальные интенсивности плазменных и ионных линий наблюдались в узком диапазоне углов ($77\text{--}79^\circ$) около направления магнитного поля. При этом пространственный размер ИВО, в которой возбуждались плазменные и ионные линии, практически не зависел от ширины диаграммы направленности антенны КВ нагревного комплекса (ФАР 1 или ФАР 3). Тем не менее интенсивность усиленных нагревом плазменных и ионных линий была выше при использовании ФАР 1, обеспечивающей $P_{\text{эфф}} = 780$ МВт. Излучение волны накачки в направлении 86° приводило к генерации очень слабых плазменных и ионных линий только при использовании ФАР 1.

Результаты выполненных экспериментов показали, что эффект магнитного зенита при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы проявлялся также в поведении мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многочисленных экспериментов, выполненных на нагревном комплексе EISCAT/Heating в г. Тромсе (Норвегия), позволили обнаружить эффект магнитного зенита (наиболее сильные возмущения ионосферной плазмы возникают в направлении магнитного поля) при воздействии на высокоширотную F-область ионосферы пучка мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации (X-мода).

Установлено, что эффект магнитного зенита при X-нагреве наблюдается на частотах волны накачки как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 и проявляется в большей степени, чем при O-нагреве.

Список используемых источников

1. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications / A. Gurevich, K. Zybin, H. Carlson, T. Pedersen // *Physics Letters A*. – 2002. – Vol. 305, № 5. – P. 264–274.
2. Ionospheric electron heating, aurora and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: aspect angle dependence / M.T. Rietveld, M.J. Kosch, N.F. Blagoveshchenskaya et al. // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108, № A4. – P. 1141. – Doi:10.1029/2002JA009543.
3. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, T. Yeoman et al. // *Geophysical Research Letters*. – 2011. – Vol. 38. – L08802. – Doi: 10.1029/2011GL046724.
4. Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, M. Kosch et al. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2014. – Vol. 119, № 12. – P. 10483–10498.
5. Сравнение эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы / Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, А.С. Калишин и др. // *Космические исследования*. – 2018. – Т. 56, № 1. – С. 17–32.
6. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility / M.T. Rietveld, A. Senior, J. Markkanen, A. Westman // *Radio Science*. – 2016. – Vol. 51, № 9. – P. 1533–1546.

А.А. Борисов,*

кандидат технических наук, доцент;

Ю.В. Кулешов,*

доктор технических наук, профессор;

А.Б. Маков*

кандидат технических наук, доцент

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

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ В НЕОСВЕЩЕННОМ В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОМ РАЙОНЕ

Разработан метод диагностики поля приземного давления в районах, недостаточно освещенных в гидрометеорологическом отношении, с использованием ранее оцененных полей геопотенциала на стандартных изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа. Представлены результаты оценивания качества разработанного метода, свидетельствующие о возможности его использования в работе оперативно-прогностических подразделений Гидрометеорологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации.

Ключевые слова: гидрометеорологическое обеспечение; диагностика поля приземного давления в районах, не освещенных в метеорологическом отношении.

ВВЕДЕНИЕ

Задача восстановления (диагностики) метеорологических полей в физико-географических районах, полностью или частично не освещенных в гидрометеорологическом отношении, имеет продолжительную историю [1–5]. Для диагностики полей метеорологических величин в различное время авторами исследований использовались физико-статистический, гидродинамический и динамико-стохастический подходы [5], которые позволили разработать методы диагностики полей геопотенциала, температуры атмосферного воздуха, скорости и направления ветра на изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа в условиях отсутствия либо ограничения на объем фактической метеорологической информации из этих районов. Вместе с тем недостаточно внимания было уделено методам диагностики полей этих метеорологических величин у поверхности Земли, что в значительной степени затрудняет проведение анализа и разработку прогноза гидрометеорологической обстановки в конкретном физико-географическом районе.

В настоящей публикации представлены результаты разработки метода диагностики поля приземного давления, определяющего положение основных барических образований, формирующих синоптическую ситуацию в рассматриваемом физико-географическом районе.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ

В Руководстве [6] рассмотрен метод восстановления поля геопотенциала на основных изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа для районов, недостаточно полно освещенных данными температурного и ветрового зондирования. Геопотенциальная высота H_p изобарической поверхности p представляется суммой:

$$H_p = H_{1000} + H_{1000}^p, \quad (1)$$

где H_{1000} – геопотенциальная высота изобарической поверхности 1000 гПа;

H_{1000}^p – превышение геопотенциала на изобарической поверхности p гПа над изобарической поверхностью 1000 гПа.

Геопотенциальная высота изобарической поверхности 1000 гПа определяется по формуле

$$H_{1000} = h(p_0 - 1000), \quad (2)$$

где h – динамическая барическая ступень, гп.дам;
 p_0 – давление, приведенное к уровню моря, гПа.

Соотношения для расчета геопотенциальной высоты H_p на изобарической поверхности p имеют вид [6]:

$$\begin{aligned} H_{850} &= h(p_0 - 1000) + 128 + 0,5T_0 + 3(0,5 - \gamma_{p_0/850}), \\ H_{700} &= h(p_0 - 1000) + 278 + T_0 + 15(0,5 - \gamma_{p_0/700}), \\ H_{500} &= h(p_0 - 1000) + 528 + 2T_0 + 50(0,5 - \gamma_{p_0/500}), \end{aligned} \quad (3)$$

где T_0 – температура воздуха у поверхности Земли в пункте оценивания H_p , °С;

$\gamma_{p_0/p}$ – средний вертикальный градиент температуры между поверхностью p_0 и рассматриваемой изобарической поверхностью p , °С/100 м.

Соотношение (3) представляет собой систему из трех алгебраических уравнений с тремя неизвестными, решая (3) относительно переменной p_0 , получаем следующее выражение:

$$p_0 = \frac{1}{h} (H_{850} - H_{700} + H_{500} + 1000h + 3\gamma_{p_0/850} + 50\gamma_{p_0/500} - 15\gamma_{p_0/700} - 397). \quad (4)$$

В работе [7] показано, что результаты, получаемые с помощью методов диагностики полей геопотенциала на основных изобарических поверхностях (850 гПа, 700 гПа, 500 гПа), удовлетворяют требованиям практики потребителей гидрометеорологической информации. Тогда для получения оценок p_0 по формуле (4) необходимо определить значения переменных h и $\gamma_{p_0/p}$.

В соответствии с Руководством [6] в зависимости от наблюдающихся значений температуры T_0 величина h может изменяться в пределах от 0,6 до 0,9 гп.дам/1 гПа. При вычислении по формуле (2) в зависимости от T_0 берутся значения h , представленные в табл. 1.

Таблица 1

Значения динамической барической ступени в зависимости от приземной температуры

№ п/п	T_0 , °С	h , гп. дам
1	Выше 15°	0,9
2	От 15 до – 15°	0,8
3	От –15 до – 40°	0,7
4	Ниже – 40°	0,6

Очевидно, что диапазон изменений T_0 , определяющий искомое значение h , может быть легко оценен с достаточной для практики точностью с использованием дополнительной ГМИ, например климатических данных.

Тогда величина барической ступени h будет определяться с помощью выражения

$$h = \begin{cases} 0,9, & T_0 \in (15^\circ\text{С}; \infty) \\ 0,8, & T_0 \in [-15^\circ\text{С}; 15^\circ\text{С}] \\ 0,7, & T_0 \in [-40^\circ\text{С}; -15^\circ\text{С}] \\ 0,6, & T_0 \in [-\infty; -40^\circ\text{С}]. \end{cases} \quad (5)$$

Для определения значений $\gamma_{p_0/p}$ над территорией, недостаточно освещенной в метеорологическом отношении, предлагается использовать эмпирическую модель атмосферы NRLMSISE. На настоящий момент последней версией модели является NRLMSISE-2000 [8], разработанная коллективом авторов (Mike Picone, Alan Hedin и Doug Drob) на основе модели MSISE-90.

Модель позволяет рассчитать профили концентраций He, O, N₂, O₂, Ar, H, N, общей массовой плотности, температуры воздуха, плотности атмосферы на высотах от поверхности Земли до 1000 км. Метеорологические величины в модели NRLMSISE-2000 представлены в виде функций от географических и солнечных/магнитных параметров. Для тестирования работоспособности модели и других нужд предусмотрены переключатели, позволяющие осуществлять включение/выключение расчета отдельных вариаций метеорологических величин.

Входными параметрами эмпирической модели NRLMSISE-2000 являются: номер дня в году, местное время, широта, долгота, высота, поток солнечного излучения на волне 10,7 см (F10.7) (среднее значение за три месяца и значение для предыдущего дня), индекс геомагнитной активности Ap.

Для подтверждения возможности использования в соотношении (4) данных о профилях температуры воздуха, полученных с использованием модели атмосферы NRLMSISE-2000, для г. Санкт-Петербург были рассчитаны профили температуры для средних месяцев сезонов 2019 года (рис. 1) и вычислены значения коэффициентов корреляции K_{T_N, T_F} между модельными значениями температуры воздуха (T_N) на различных высотах и значениями температуры, полученными по данным реанализа (T_F) [9].

Полученные оценки коэффициентов корреляции K_{T_N, T_F} представлены в табл. 2.

Анализ содержимого табл. 2, а также графиков, изображенных на рис. 1, позволяет говорить о высокой корреляции профилей температуры, полученных по модели NRLMSISE-2000 и результатам температурно-ветрового зондирования до высот 12–13 км, и полагать возможным использование оценок, полученных по модели NRLMSISE-2000, при расчетах по формуле (4).

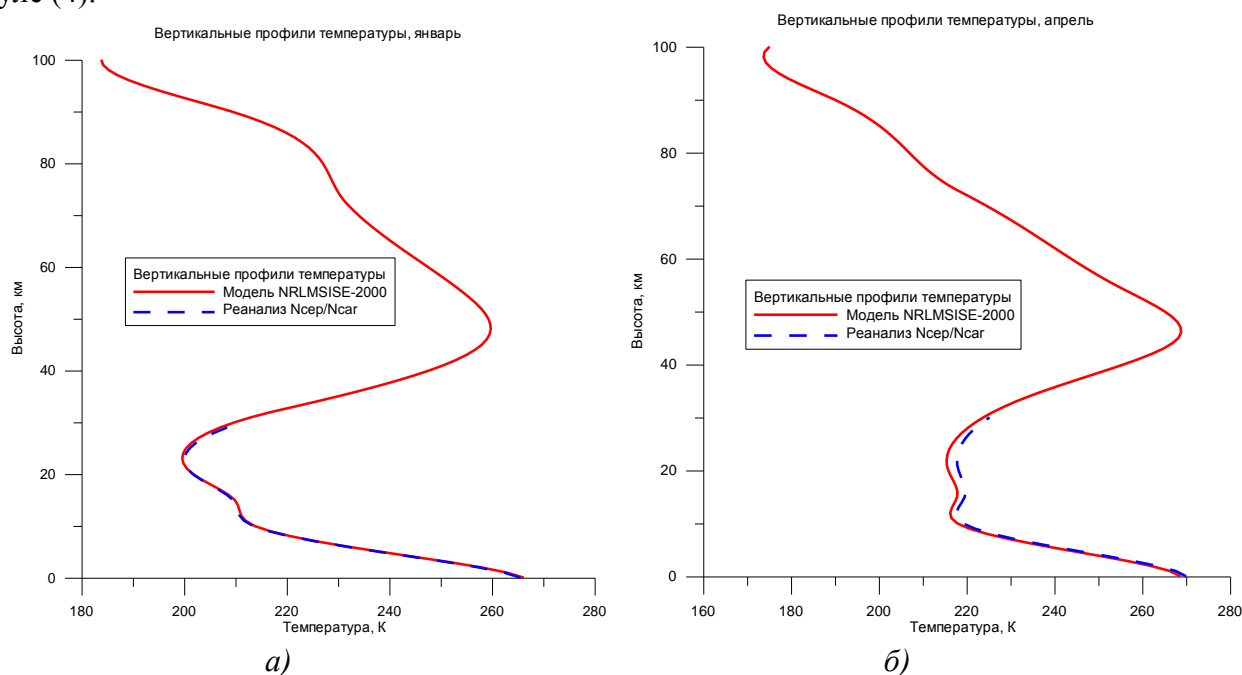


Рис. 1. Вертикальные профили средних значений температуры воздуха по данным модели NRLMSISE-2000 и TB3:

а – для января; б – для апреля;

в – для июля; г – для октября (начало)

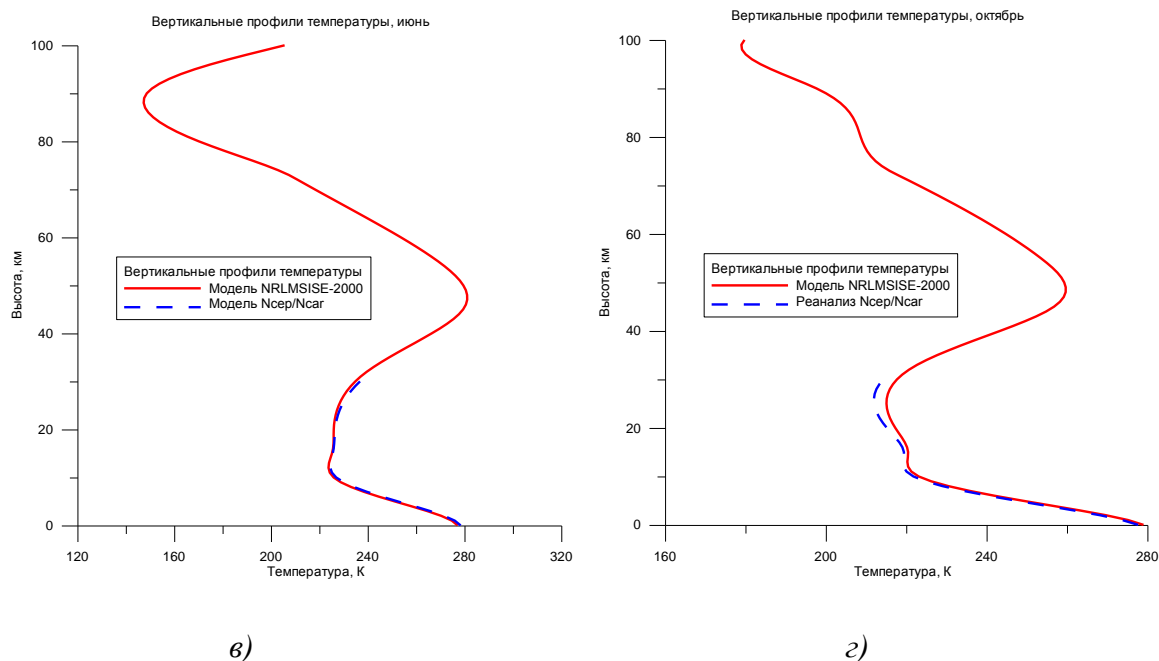


Рис. 1. Вертикальные профили средних значений температуры воздуха по данным модели NRLMSISE-2000 и TB3:
а – для января; б – для апреля;
в – для июля; г – для октября (окончание)

Таблица 2

Оценки коэффициентов корреляции K_{T_N, T_F} для средних месяцев сезонов года

Высота, км	Месяц			
	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
0	0,9	0,8	0,7	0,9
1	0,9	0,8	0,8	0,8
2	0,8	0,9	0,8	0,9
3	0,8	0,8	0,9	0,8
4	0,9	0,9	0,8	0,9
5	0,8	0,9	0,9	0,8
6	0,8	0,9	0,8	0,8

Кроме того, результаты моделирования с использованием модели NRLMSISE-2000 показали, что до высоты, соответствующей изобарической поверхности 500 гПа, выполняется условие $\gamma_{p_0/850} \approx \gamma_{p_0/700} \approx \gamma_{p_0/500}$. Тогда выражение (4) примет следующий вид:

$$p_0 = \frac{1}{h} (H_{850} - H_{700} + H_{500} + 1000h + 38\gamma - 397), \quad (6)$$

где γ – средний вертикальный градиент температуры, $\gamma = \gamma_{p_0/500}$.

Таким образом, выражение (6) совместно с эмпирической моделью NRLMSISE-2000 позволяет диагностировать поле атмосферного давления у поверхности Земли и является базовым соотношением, используемым для диагностики поля приземного давления в неосвещенном в метеорологическом отношении географическом районе.

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ

На основе соотношения (6) с использованием эмпирической модели NRLMSISE-2000 разработан метод диагностики поля приземного давления в узлах регулярной сетки. Блок-схема этого метода показана на рис. 2.

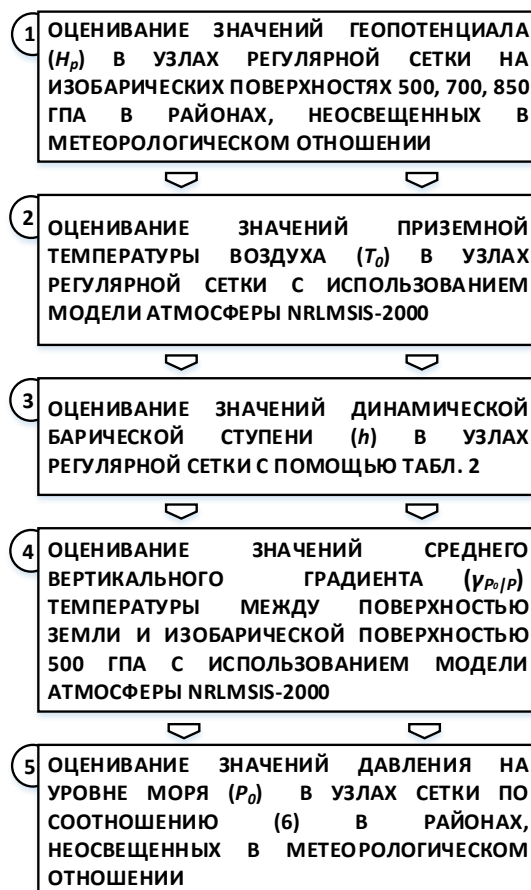


Рис. 2. Блок-схема метода диагностики поля приземного давления в неосвещенном в метеорологическом отношении географическом районе

Разработанный метод представлен в виде пяти блоков, каждый из которых выполняет законченную операцию.

Входной информацией для указанного выше метода являются гидрометеорологические данные из районов, граничащих с областями, неосвещенными в гидрометеорологическом отношении.

Рассмотрим подробнее содержание операций, выполняемых в каждом блоке блок-схемы метода диагностики.

Блок №1. Используя вспомогательную информацию, например [7], находятся оценки полей геопотенциала (H_p) на основных изобарических поверхностях ($p = 850, 700, 500$ гПа) в узлах регулярной сетки над районом, не освещенным в метеорологическом отношении.

Блок №2. С помощью эмпирической модели NRLMSISE-2000 осуществляется оценивание приземной температуры T_0 в узлах регулярной сетки. Входные данные для модели NRLMSISE-2000 (поток солнечного излучения на волне 10,7 см (F10.7), индекс A_p для вы-

ражения геомагнитной активности) предоставляются учреждением Росгидромета – Институтом прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова.

Блок №3. На основе оценок T_0 , полученных ранее, с помощью соотношений (5) получаются оценки динамической барической ступени h .

Блок №4. С помощью эмпирической модели NRLMSISE-2000 находятся оценки градиента температуры воздуха от поверхности Земли до высоты изобарической поверхности 500 гПа ($\gamma_{p_0/500}$) в узлах регулярной сетки.

Блок №5. С помощью соотношения (6) в узлах регулярной сетки находятся оценки p_0 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ

Территория, для которой производились расчеты, ограничена следующими координатами: 60°с.ш. 0°в.д., 45°с.ш. 0°в.д., 60°с.ш., 30°в.д., 45°с.ш. 30°в.д. В качестве исходной информации для оценивания поля геопотенциала на изобарических поверхностях ($p = 850, 700, 500$ гПа) использовались архивные данные [9] за 2012 г.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты применения разработанного метода диагностики для срока 00 GMT 25.02.2012 г. На данном рисунке приведен фрагмент приземной карты погоды, содержащей изобары давления на уровне моря, полученные по данным реанализа (выделены черным цветом), и восстановленные с помощью разработанного метода диагностики (выделены красным цветом).

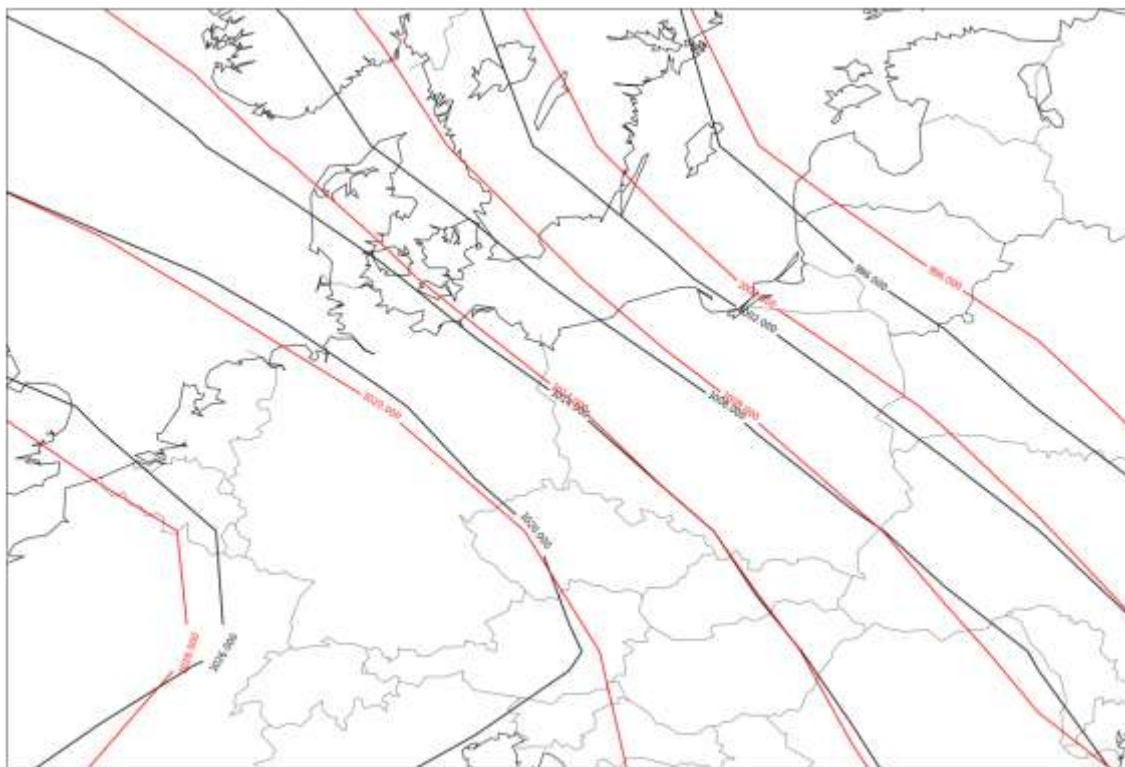


Рис. 3. Карты атмосферного давления на уровне моря
за срок 00 GMT 25.02.2012

Для оценивания качества разработанного метода диагностики p_0 в соответствии с методическими рекомендациями [10] рассчитывались оценки следующих показателей качества:

- средние абсолютные ошибки (δ);
- средние квадратические ошибки (σ);
- коэффициент корреляции (r) между значениями p_0 в узлах сетки сравниваемых объективных анализов.

Результаты расчетов показателей качества для центральных месяцев сезона 2015 г. приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценки показателей качества схем объективного анализа Гидрометцентра России и разработанной модели

№ п/п	Испытываемая схема	Показатели качества		
		Средняя абсо- лютная ошиб- ка, δ	Средняя квадра- тическая ошибка, σ	Коэффициент корреляции, r
Январь				
1	NCEP/NCAR	1,7	2,0/1,54;2,56	0,96
2	Разработанная модель	1,9	2,4/1,72;3,02	0,92
Апрель				
3	NCEP/NCAR	1,8	2,2/1,58;2,81	0,93
4	Разработанная модель	2,1	2,6/1,87;3,32	0,89
Июль				
5	NCEP/NCAR	1,7	2,0/1,54;2,56	0,97
6	Разработанная модель	1,9	2.3/1,66;2,94	0,93
Октябрь				
7	NCEP/NCAR	2,1	2,5/1,80;3,21	0,94
8	Разработанная модель	2,3	2,7/1,94;3,45	0,91

Сравнительный анализ оценок показателей качества используемого объективного анализа и разработанного метода диагностики позволяет говорить о превосходстве в точности схемы [9], что, очевидно, объясняется характером допущений и упрощений, положенных в основу соотношения (6). Вместе с тем оценки границ доверительных интервалов, рассчитанных для σ , указывают на соизмеримость оценок полей давления p_0 , полученных по испытываемым моделям. Это свидетельствует о возможности использования разработанного метода при диагностировании поля давления на уровне моря в районах, не освещенных в гидрометеорологическом отношении. Полученные при использовании разработанного метода диагностики поля p_0 , H_p могут быть использованы в качестве начальных условий при разработке численных прогнозов погоды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод диагностики поля приземного давления в неосвещенном в метеорологическом отношении географическом районе играет важную роль при разработке краткосрочных прогнозов погоды с заблаговременностью $\tau \leq 12$ ч, поскольку результаты его применения позволяют оценить синоптическую ситуацию, складывающуюся в районе, в случае, когда по тем или иным причинам отсутствуют данные наблюдений с сети синоптических станций.

Список используемых источников

1. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 359 с.
2. Покровский О.М., Иваныкин Е.Е. Численный анализ поля геопотенциала по данным дистанционного зондирования атмосферы // Метеорология и гидрология. – 1976. – №2. – С. 39–48.
3. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 376 с.
4. Комаров В.С., Креминский А.В., Попов Ю.Б. Применение комплексной методики прогнозирования в задачах пространственной экстраполяции мезометеорологических полей на неосвещенную данными наблюдений территорию // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11, № 8. – С. 808–819.
5. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии / В.С. Комаров, В.А. Кураков, Ю.Б. Попов, С.С. Суворов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 236 с.
6. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды / С.Л. Белоусов, А.А. Васильев, Н.Ф. Вельтищев, Н.Г. Леонов. – Л.: Гидрометиздат, 1986. – Ч. 1. – 696 с.
7. Ильин С.Н. Динамико-стохастический метод пространственной экстраполяции метеорологических полей в области мезомасштаба: дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29: защищена 25.02.05 / Ильин Сергей Николаевич. – Томск, 2005. – 129 с.
8. Upper Atmosphere Model. – URL: <https://uamod.wordpress.com>. (дата обращения: 27.09.2019).
9. National Oceanic and Atmospheric Administration. – URL: <https://www.noaa.gov>. (дата обращения: 27.09.2019).
10. РД 52.27.284. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – М.: Госгидромет, 1991. – 152 с.

А.А. Борисов*,

кандидат технических наук, доцент;

А.Б. Маков*,

кандидат технических наук, доцент;

С.С. Суворов*,

доктор физико-математических наук, профессор

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

МОДЕЛЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Представлена методология оценивания эффективности решения задач гидрометеорологического обеспечения. В качестве показателя эффективности предлагается использовать вероятность решения задачи гидрометеорологического обеспечения. Получение оценок соответствующего показателя эффективности является трудно реализуемым в классической постановке задачи. Предлагается искомую вероятность решения задачи аппроксимировать некоторой функцией распределения, оценивая параметры распределения по архивным данным о качестве разработанных прогнозов гидрометеорологической обстановки.

Ключевые слова: эффективность гидрометеорологического обеспечения, прогнозирование гидрометеорологических условий, логит-регрессия.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что гидрометеорологическое обеспечение (ГМО) войск представляет собой комплекс мероприятий, проводимых гидрометеорологическими подразделениями (частями) в интересах органов военного управления, войск с целью своевременного предоставления им полной и достоверной гидрометеорологической информации (ГМИ).

Поскольку факторы природной среды способны оказывать существенное влияние на функционирование образцов вооружения и военной техники и действия личного состава воинских формирований, деятельность гидрометеорологических подразделений, осуществляющих ГМО, подлежит оцениванию для определения степени его соответствия целям, стоящим перед войсками в ходе операции.

Решение задачи оценивания успешности ГМО требует наличия соответствующего научно-методического аппарата, центральное место в котором занимает модель показателя эффективности ГМО действий войск.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Ввиду того, что ГМО представляет собой целенаправленный процесс, научной базой для разработки научно-методического аппарата его исследования будет теория эффективности целенаправленных процессов (ТЭЦП), являющаяся инструментом теории исследования операций для изучения целенаправленных процессов.

Для оценивания успешности проводимых операций в ТЭЦП в качестве показателя эффективности используется вероятность достижения цели $P_{\text{дц}}(\hat{Y}_{<n>})$ [2], где $\hat{Y}_{<n>}$ – векторный показатель виртуального качества результатов операции, $\hat{Y}_{<n>} = \langle \hat{Y}_{<n_1>}, \hat{Y}_{<n_2>}, \hat{Y}_{<n_3>} \rangle$, включающий в себя три компоненты: $\hat{Y}_{<n_1>}$ – показатель (вектор) виртуального операцион-

ного целевого эффекта; $\hat{Y}_{<n_2>}$ – показатель (вектор) виртуальных затрат операционных ресурсов; $\hat{Y}_{<n_3>}$ – показатель (вектор) виртуальных затрат операционного времени на получение целевых эффектов; $n = n_1 + n_2 + n_3$.

Однако применение классического подхода к оцениванию эффективности целенаправленных процессов в рассматриваемом случае представляется затруднительным. Действительно, вероятность достижения цели ГМО $P_{\text{дц}}(\hat{Y}_{<n>})$ зависит от большого числа различных факторов, например способности системы ГМО проводить гидрометеорологические наблюдения в различных географических районах, в том числе не освещенных в гидрометеорологическом отношении по причине ведения в них боевых действий либо их труднодоступности для размещения средств гидрометеорологических измерений, своевременно обеспечивать органы военного управления и прогностические органы фактической и прогностической ГМИ от средств измерения и других источников, разрабатывать качественные прогнозы гидрометеорологических условий (ГМУ) и др.

Вследствие сложности описания результатов ГМО с помощью показателей качества ($\hat{Y}_{<n_1>}, \hat{Y}_{<n_2>}, \hat{Y}_{<n_3>}$) в форме совместных многомерных законов распределения случайных векторов и интерпретации полученных результатов для оценивания эффективности ГМО предлагается использовать подход, подразумевающий разделение ГМО на отдельные «элементарные» операции и применение уже к ним традиционного подхода к оцениванию эффективности.

В качестве принципа разделения предлагается использовать разделение в соответствии с основными задачами ГМО, решаемыми оперативно-прогностическими подразделениями ГМС ВС РФ.

Очевидно, что конкретный состав задач ГМО зависит от задач, решаемых воинскими формированиями. Вместе с тем из общего перечня можно выделить задачи, от качественного решения которых будут зависеть итоги операций (боевых действий). К ним можно отнести:

- проведение гидрометеорологических наблюдений;
- сбор и распространение ГМИ;
- обработка и анализ ГМИ, включающая разработку прогнозов ГМУ.

Последняя из представленного перечня задач относится к числу задач, решаемых практически всеми гидрометеорологическими подразделениями ГМС ВС РФ. Поэтому разработка показателя эффективности будет проводиться для оценивания этой задачи ГМО.

Анализ руководящих документов Росгидромета [3, 4], ГМС ВС РФ [5], а также современной технологии прогнозирования ГМУ показал, что для успешной разработки прогноза необходимо выполнение ряда условий, как то:

- наличие в распоряжении инженера-синоптика минимально необходимого для разработки прогноза погоды заданной заблаговременности объема гидрометеорологических данных;
- наличие методов прогнозирования гидрометеорологических величин (явлений погоды), качество которых обеспечивает успешную разработку прогнозов различной заблаговременности;
- наличие концептуальных моделей процессов и явлений, характерных для районов прогнозирования;
- наличие у инженера-синоптика опыта работы в должности, соответствующей уровню задач, решаемых обеспечиваемым воинским формированием.

Степень реализации данных условий при разработке прогнозов гидрометеорологической обстановки обуславливает величину вероятности достижения цели операции ($P_{\text{пр}} = P_{\text{дц}}(\hat{Y}_{<n>})$) – разработки точного и достоверного прогноза ГМУ и характеризуется повторяемостью данных условий. Их оценки могут быть получены на основе обработки архивного материала, ведущегося в гидрометеорологических подразделениях.

В соответствии с методологией оценивания эффективности, принятой в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, степень достижения цели любой операции зависит от количественного выражения таких ее атрибутивных свойств, как результативность ($\hat{Y}_{\langle n_1 \rangle} = \hat{\varepsilon}_{\langle n_1 \rangle}$), ресурсоемкость ($\hat{Y}_{\langle n_2 \rangle} = \hat{r}_{\langle n_2 \rangle}$) и оперативность ($\hat{Y}_{\langle n_3 \rangle} = \hat{t}_{\langle n_3 \rangle}$). Определим их для случая оценивания эффективности операции разработки точного и достоверного прогноза ГМУ.

Представим величины, обуславливающие вероятность $P_{\text{пр}}$ успешного решения задачи прогнозирования, в терминах ТЭЦП.

Оперативность $\hat{t}_{\langle n_3 \rangle}$ разработки прогноза ГМУ характеризуется временем \hat{t} , потребным для его разработки. Поскольку величина \hat{t} определяется технологией разработки прогноза, следовательно, $\hat{t} = \hat{z}_3$, где \hat{z}_3 – директивное (плановое) время, отводимое на разработку прогноза конкретной заблаговременности. В ТЭЦП говорят, что соответствующий операнд в критерии пригодности результатов операции поглощается остальными операндами. Таким образом, критерий пригодности результатов операции прогнозирования примет вид

$$G_P : [(\hat{\varepsilon} \geq \hat{z}_1) \cap (\hat{r} \leq \hat{z}_2) \cap (\hat{t} \leq \hat{z}_3)] \approx [(\hat{\varepsilon} \geq \hat{z}_1) \cap (\hat{r} \leq \hat{z}_2)], \quad (1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varepsilon} &= \varepsilon(\hat{z}_3) \\ \hat{r} &= r(\hat{z}_3) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

являются операционным функционалом.

Соотношения (1) и (2) означают, что целевой эффект $\hat{\varepsilon}$ и расходы ресурсов \hat{r} обусловлены требуемым временем \hat{t} на проведение операции, и для достижения цели операции необходимо и достаточно, чтобы выполнялись соответствующие условия $(\hat{\varepsilon} \geq \hat{z}_1) \cap (\hat{r} \leq \hat{z}_2)$.

Из практики ГМО действий войск известно, что ресурсоемкость \hat{r} операции прогнозирования определяется следующим:

- полнотой объема ГМИ (*data*), необходимой для разработки прогнозов;
- опытом инженера-синоптика (*exper*), разрабатывающего прогноз ГМУ.

Результативность $\hat{\varepsilon}$ операции определяется:

- точностью (*sd*) – средним квадратическим отклонением результатов объективного анализа и численных прогнозов погоды;
- успешностью (*suc*) метода прогнозирования ГМУ, используемого в оперативной практике.

Тогда показатель ресурсоемкости операции прогнозирования примет следующий вид:

$$\hat{r}_{\langle 2 \rangle} = \langle data, exper \rangle, \quad (3)$$

а показатель результативности:

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

В рамках ТЭЦП показатель $P_{\text{пр}}$ находится в соответствии со следующим выражением:

$$P_{\text{пр}} = P(\hat{Y}_{\langle 2 \rangle} \in \{\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}^b\}) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}}(Y_{\langle 2 \rangle}^{\text{тр}}) dF_{\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}}(Y_{\langle 2 \rangle}^{\text{тр}}), \quad (5)$$

где $\Phi_{\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}}(\cdot)$ – функция распределения вектора $\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}$;

$dF_{\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}^{\text{тр}}}(\cdot)$ – плотность распределения вектора $\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}^{\text{тр}}$, $dF_{\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}^{\text{тр}}}(\cdot) = \phi_{\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}^{\text{тр}}}(\cdot) d\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}^{\text{тр}}$, где показатель виртуального качества результатов операции имеет вид

$$\hat{Y}_{\langle 2 \rangle} = \langle \hat{\varepsilon}_{\langle 2 \rangle}, \hat{r}_{\langle 2 \rangle} \rangle = \langle sd, suc, data, exper \rangle, \quad (6)$$

а показатель требуемого качества результатов операции:

$$\hat{Y}_{\langle 2 \rangle}^{TP} = \langle z_{\langle 2 \rangle}^{1TP}, z_{\langle 2 \rangle}^{1TP} \rangle = \langle sd^{TP}, suc^{TP}, data^{TP}, exper^{TP} \rangle. \quad (7)$$

Очевидно, что для оценивания $P_{пр}$ с использованием выражения (5) необходима информация о законах распределения и их параметрах для составляющих векторов $\hat{Y}_{\langle 3 \rangle}$ и $\hat{Y}_{\langle 3 \rangle}^{TP}$. Их нахождение и последующее интегрирование выражения (5) делает задачу оценивания $P_{пр}$ трудно реализуемой в классической постановке.

Анализ исследований в области эконометрии, диагностической медицины, токсикологии и других отраслях науки [6] показал, что для решения задачи оценивания вероятности появления некоторого события с успехом используется подход, согласно которому искомая вероятность аппроксимируется некоторой функцией распределения, т.е.

$$P_{дц} = P_{дц}(res = 1 | PR^T) = F_{зр}(PR^T A), \quad (8)$$

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

Использование конкретных законов распределения приводит к различным моделям бинарного выбора. В рамках настоящей работы оценки $P_{пр}$ находились с использованием логит-регрессии, тогда

$$P_{дц} = P_{дц}(res = 1 | PR^T) = \Lambda(PR^T A) = \frac{e^{PR^T A}}{1 + e^{PR^T A}}. \quad (9)$$

Оценивание неизвестных коэффициентов ($A = \langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 \rangle$) логистической регрессии производится с помощью метода максимального правдоподобия. Этому этапу предшествует этап отбора информативных предикторов. В настоящей работе информативные предикторы выбирались из множества потенциальных с помощью метода отбора предикторов с включением [7].

Тогда, принимая во внимание (3) и (4), выражение для получения оценок $P_{пр}$ с использованием предикторов, определяющих качество прогнозов ГМУ, примет следующий вид:

$$P_{пр} = P_{пр}(res = 1 | Y^T) = \Lambda(Y^T A) = \frac{e^{a_0 + a_1 data + a_2 exper + a_3 sd + a_4 suc}}{1 + e^{a_0 + a_1 data + a_2 exper + a_3 sd + a_4 suc}}, \quad (10)$$

где Y – вектор предикторов, включающий в себя следующие компоненты: $data$ – степень полноты ГМИ, необходимой для разработки прогнозов различной заблаговременности; $exper$ – опыт инженера-синоптика, разрабатывающего прогноз ГМУ, sd – точность (СКО) результатов объективного анализа (ЧПП), suc – успешность метода прогнозирования ГМУ, используемого в оперативной практике.

Для получения оценок составляющих вектора A воспользуемся данными, полученными при оценивании успешности прогнозов ГМУ в метеорологических подразделениях 11 армии ВВС и ПВО. Общий вид таблицы с данными выборочной совокупности представлен на рис. 1.

Объем выборочной совокупности – 150 случаев. Данные (рис. 1), используемые для нахождения оценок коэффициентов регрессии A , включают в себя информацию о степени полноты исходных гидрометеорологических данных [*data*: 0 – данные неполные, 1 – данные полные), опыте работы в должности инженера-синоптика, разрабатывавшего прогноз ГМУ (*exper*: 0 – опыт в должности менее года, 1 – опыт работы в должности более года, но менее 2 лет и т.д.), точности используемого синоптического материала (*sd*) [3], успешности методов прогнозирования ГМУ (*suc* – *общая оправдываемость метода прогнозирования в процентах*), качестве разработанных прогнозов ГМУ (*res*: 1 – прогноз оправдался, 0 – прогноз не оправдался) [5].

№ п/п	Предикторы				Результат прогнозирования
	<i>data</i>	<i>exper</i>	<i>sd</i>	<i>suc</i>	<i>res</i>
1	1	1	2,0	0,88	1
2	1	0	1,9	0,88	1
3	0	2	2,9	0,81	0
150	1	2	1,7	0,84	1

Рис. 1. Общий вид таблицы с данными выборочной совокупности для оценивания успешности прогнозов ГМУ

Оценки коэффициентов логистической регрессии для полученной выборки и рассчитанные для них уровни значимости представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки коэффициентов логистической регрессии

Коэффициенты	Значения	Стандартное отклонение	z-значение
a_0	-21,3	5,36	-3,97
a_1	2,2	0,87	2,51
a_2	0,12	0,01	0,11
a_3	0,46	0,03	-0,41
a_4	24,1	5,82	2,8

Анализ содержимого табл. 1 позволяет говорить о значимости полученных результатов.

Исходя из полученных результатов, выражение (10) для прогнозирования благоприятного исхода ($y = 1$) примет следующий вид:

$$P_{\text{пр}} = P(y = 1 | X) = \frac{e^{2,2data + 0,12exper + 24,1suc + 0,46sd - 21,3}}{1 + e^{2,2data + 0,12exper + 24,1suc + 0,46sd - 21,3}} \quad (11)$$

Для оценивания качества разработанной модели (11) на эмпирическом материале, представленном гидрометеорологической службой ВВО, были вычислены оценки показателя $P_{\text{пр}}$ и рассчитано значение показателя точности (*Acc*) модели [7], характеризующего количество правильно разработанных прогнозов ГМУ. Часть полученных оценок показателя эффективности и значение показателя точности модели (11) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки показателя эффективности ГМО

№ п/п	Предикторы				Результат прогнозирования	Показатель эффективности	Точность модели
	<i>data</i>	<i>exper</i>	<i>sd</i>	<i>suc</i>	<i>res</i>	$P_{пр}$	<i>Acc</i>
1	0	0	2,0	0,76	0	0,12	0,93
2	0	1	2,0	0,63	1	0,01	
3	1	1	2,0	0,79	1	0,73	
4	1	1	2,0	0,82	1	0,84	
5	1	2	2,0	0,63	0	0,10	
6	1	2	2,0	0,82	0	0,90	
7	1	0	2,0	0,91	1	0,97	

Значение показателя точности (*Acc*) для текущей выборки составило 0,93, что позволяет говорить о хорошей точности получаемых результатов и возможности использования разработанной модели (11) для оценивания эффективности задачи ГМО прогнозирования ГМУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время не вызывает сомнения факт существенного влияния ГМУ на действия войск (сил). Очевидно, что при планировании операций (боевых действий) органам военного управления необходимо иметь сведения об эффективности гидрометеорологического обеспечения, осуществляемого соответствующей гидрометеорологической службой.

Предложенная в статье методология разработки модели показателя эффективности позволяет получать оценки эффективности одной из основных задач ГМО – разработки прогнозов ГМУ на основе обработки архивного материала, ведущегося в гидрометеорологическом подразделении, без проведения сложных математических расчетов, включающих оценивание законов совместного распределения частных показателей качества, интегрирования уравнения для вероятности решения задачи ГМО.

Рассмотренная методология может быть с успехом распространена на оценивание эффективности решения других задач ГМО.

Список используемых источников

1. Военный энциклопедический словарь. – М.: Воениздат, 2007. – 872 с.
2. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – МО РФ, 1989. – Ч. 1. – 660 с.
3. РД 52.27.723 – 2009. Базовые требования к технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды. – Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2009. – 38 с.
4. РД 52.27.724 – 2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2009. – 66 с.
5. Руководство по практическим работам метеорологических подразделений авиации Вооруженных Сил. – М.: Воениздат, 1992. – 486 с.
6. Мхитарян В.С. Эконометрика: учебник. – М.: Проспект, 2010. – 382 с.
7. Джеймс Г. Введение в статистическое обучение с примерами на языке R. – М.: ДМК, 2016. – 446 с.

И.Д. Брюханов*, **;

О.Ю. Локтюшин*;

И.В. Самохвалов*,

доктор физико-математических наук, профессор

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск.

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

ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ СЛЕДОВ САМОЛЕТОВ ПО ДАННЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Корректный учет микроструктуры конденсационных следов самолетов, относящихся к облакам верхнего яруса антропогенного происхождения, в климатических моделях атмосферы невозможно сделать без выяснения механизмов образования аэрозольных частиц в самолетных следах и трансформации их характеристик со временем. В работе описываются результаты исследования временной трансформации микроструктуры конденсационных следов с помощью уникального высотного поляризационного лидара НИ ТГУ. Сделаны оценки повторяемости формирования самолетных следов с преимущественной горизонтальной ориентацией ледяных кристаллов, приводящей к аномальному обратному рассеянию оптического излучения.

Ключевые слова: самолетный след, лазерное зондирование, поляризационный лидар, матрица обратного рассеяния света, облака верхнего яруса, «зеркальные» облака.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата и всё большее влияние человека на окружающую среду вызывают растущую потребность в понимании природных процессов и инструментах для адекватного долго- и краткосрочного прогнозирования погоды и климата. Вместе с тем широкий ряд атмосферных явлений всё еще требует более глубокого изучения. К числу таких неучтенных климатообразующих факторов относятся облака верхнего яруса (ОВЯ), важным свойством которых является горизонтальная протяженность до тысячи километров [1], из-за чего они покрывают, по разным оценкам, от 20 [2] до 50% [3] поверхности Земли. Пропускание ими оптического излучения, а потому и влияние на радиационный баланс атмосферы Земли, определяется микрофизическими параметрами ансамблей ледяных кристаллов [4], из которых они в основном и состоят [1]. Нередкой является ситуация, когда при в определенных метеоусловиях кристаллические частицы льда ориентируются горизонтально, что приводит к аномальному обратному рассеянию света. Такие облака получили название зеркальных [3].

Всемирная метеорологическая организация относит долгоживущие (более 10 мин) самолетные следы [5] к облакам антропогенного происхождения (*Cirrus Homogenitus*). В зависимости от способности сохранять свою линейную форму их делят на устойчивые самолетные следы и перистые облака, сформировавшиеся из них. Изменение ими глобального облачного покрова создает дисбаланс между приходящей солнечной радиацией и уходящей от земной поверхности и атмосферы, что приводит к радиационному воздействию на климат, изменяющему распределение температуры в нижней атмосфере [6, 7]. По некоторым оценкам, вклад авиации в общее антропогенное воздействие на климат составляет 3–8% [8]. Наблюдения в 1971–1995 годах показали [9], что частота появления перистых облаков в северных океанах и США значительно увеличилась вследствие возросшей интенсивности авиационного трафика. К 2050 году прогнозировался 5%-ный ежегодный рост авиатрафика [9, 10], что должно было привести к почти двукратному росту относительно 2015 года [11]. Несмотря на снижение плотности полетов гражданских самолетов, вызванное повсеместными запретами и карантинами на фоне пандемии новой коронавирусной инфекции осени 2019 года – весны 2020-го, важность авиации в жизни современного социума

трудно переоценить, а потому весьма ожидаемо, что плотность полетов восстановится после победы над вирусом.

Следует отметить, что конденсационные следы на начальной стадии формирования невозможно обнаружить спутниковыми средствами, так как их поперечные размеры слишком малы. К моменту надежного обнаружения, в среднем, такое антропогенное облако уже существует $1,5 \pm 0,4$ часа. Поскольку полное время существования такого аэрозольного образования составляет $3,7 \pm 2,8$ часа [10], наземный лидар, расположенный на пути дрейфа самолетного следа, представляет собой незаменимый инструмент для исследования микроструктуры и эволюции конденсационных следов.

ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ САМОЛЕТНЫХ СЛЕДОВ

Высотный поляризационный лидар НИ ТГУ находится в южной части г. Томска, в полукилометре от берега реки Томь. В радиусе 100 км от города проходит ряд трасс регулярного авиационного сообщения [12]. При отсутствии низкой облачности и благоприятном направлении ветра конденсационные следы самолетов появляются в поле зрения лидара, с помощью которого определяются как геометрические, так и оптические характеристики следа и, что самое главное, матрица обратного рассеяния света (МОРС). Эксперименты по исследованию следов выполняются на лидаре с 2016 года [13]. Сопоставление экспериментально получаемых МОРС с рассчитанными теоретически позволяет оценивать микроструктуру следов [14].

Для мониторинга авиационной обстановки, расчета параметров дрейфа [15] самолетных следов к месту расположения лидара и дальнейшего их сопоставления с результатами лидарных экспериментов разработан программный пакет. Алгоритм расчета параметров дрейфа следов для каждой точки траектории самолета [12] загружает метеоданные с ближайших к Томску метеостанций [16], выделяет направление ветра на соответствующих высотах и сравнивает с рассчитанным азимутом на лидар. В случае непревышения допустимой их разности рассчитывается дистанция до лидара, и с учетом загруженной скорости ветра оценивается длительность дрейфа к лидару. Таким образом, регистрация лидаром в соответствующее время и на соответствующей высоте аэрозольных образований позволяет идентифицировать их как конденсационные следы. Запись траекторий полетов самолетов автоматизирована и выполняется непрерывно. На рис. 1 показана обобщенная статистическая информация о полетах в радиусе 100 км от Томска и тех из них, конденсационные следы от которых дрейфовали в направлении Томска.

Каждый месяц, с сентября 2019 года по 15 марта 2020 года больше половины самолетных следов (в среднем 61%) дрейфовали в направлении Томска. Даже в феврале, когда количество полетов вокруг Томска сократилось в 1,5–1,7 раза, эта тенденция сохранилась (65%). Данные первой половины марта показывают несколько меньшую долю (55%), однако следует учитывать, что накопленный в этом месяце массив данных – неполный. Значительная доля регулярных авиарейсов, пролегающих в радиусе 100 км от Томска, связывает европейские и азиатские страны. По-видимому, спад зарегистрированного трафика объясняется новой коронавирусной пандемией и вызванным ею сокращением полетов в эти государства.

В качестве примера в табл. 1 приведены параметры траекторий самолетов, рассчитанные параметры дрейфа их следов к лидару НИ ТГУ и оптические характеристики следов по лидарным данным. При расчетах параметров дрейфа следов использовались шар-зондовые метеоданные [16], полученные в 19:00 того же дня на метеостанции в г. Колпашево. Все наблюдавшиеся в указанный день самолетные следы были зеркальными. Такой вывод был сделан, поскольку отношение рассеяния у каждого из них превышает 10, оптическая толща –

меньше единицы, а элемент m_{44} матрицы обратного рассеяния – меньше $-0,4$ [17]. При этом третий из них хоть и проявляет свойства зеркального, но слабо.

На рис. 2 представлены данные статистики по доле зеркальных самолетных следов от общего количества зарегистрированных лидаром и по доле количества серий лидарных измерений (длительностью 16 мин 40 с каждая), в течение которых наблюдались ОВЯ (без разделения на облака естественного и самолетного происхождения), от общего количества лидарных экспериментов. Малое количество серий в рассмотренный период объясняется частым наличием низкой облачности в поле зрения лидара. Вместе с тем, как видно на рис. 2,б, запись лидарных сигналов систематически выполняется и в условиях безоблачной атмосферы.

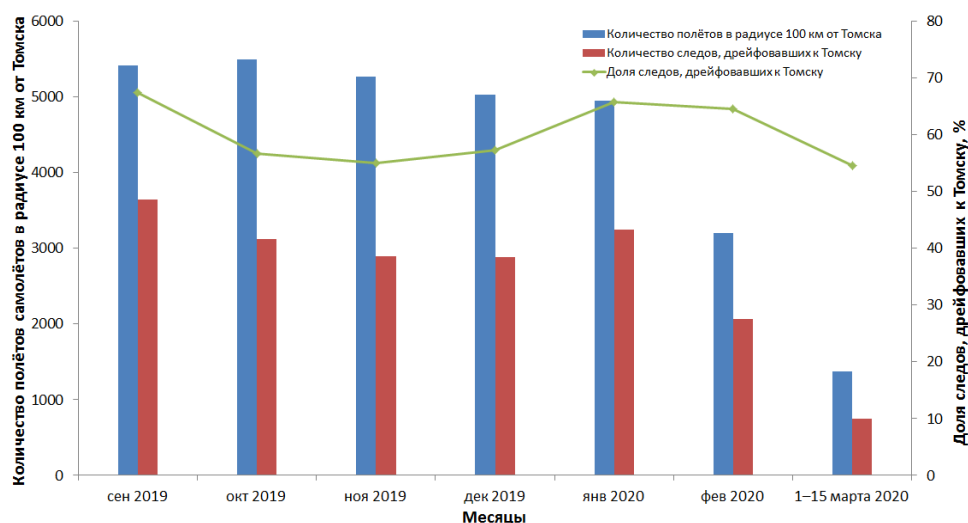


Рис. 1. Количество полетов самолетов в радиусе 100 км от Томска, а также количество и доля самолетных следов, дрейфовавших к Томску [12]

Таблица 1

Параметры полетов самолетов, оцененные параметры их дрейфа и оптические характеристики по данным лидарных измерений (13.09.2019 г.)

Время регистрации лидаром / появления над лидаром	Рейс / дистанция (км) / длительность дрейфа к лидару (мин)	Высота полета (км) / диапазон высот зарегистрированного лидаром слоя (км)	Отношение рассеяния / оптическая толщина / m_{44} , (h, км)
17:28–17:32 17:30	HU489/СНН489 89,1 47,3	11,0 9,2–10,7	36,03 0,35 –0,82 (10,4)
19:51–19:59 19:52	CA935/ССА935 89,6 59,3	11,6 8,9–11	310,58 0,49 –0,62 (10,1)
20:42–20:43 20:42	CA855/ССА855 93,4 49,5	11,0 9,2–10,4	12,79 0,32 –0,48 (9,8)

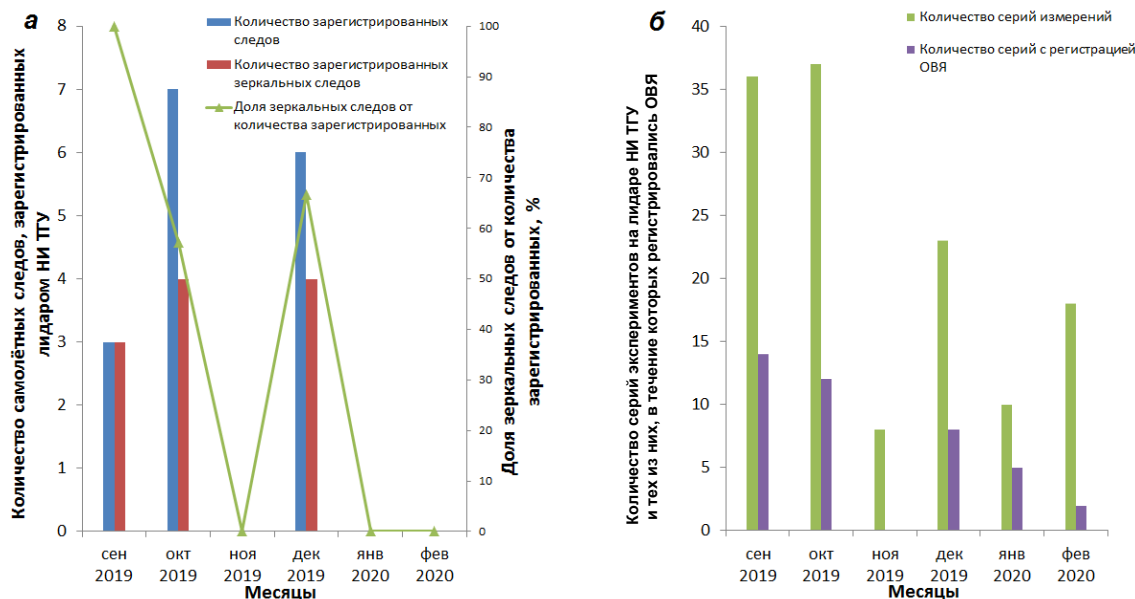


Рис. 2. Количество самолетных следов, зарегистрированных лидаром НИ ТГУ, количество и доля «зеркальных» среди них (а), а также количество серий лидарных измерений и количество тех из них, в течение которых регистрировались ОВЯ (б)

Провалы в доле зеркальных следов от общего количества зарегистрированных в ноябре, январе и феврале вызваны, по-видимому, малым количеством исследованных следов в указанные месяцы. Однако когда удастся их зондировать, ситуация зеркального отражения ими оптического излучения нередка (минимум – 37%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный массив данных статистически мал, что объясняется сравнительно недавним началом систематической записи траекторий полетов самолетов вблизи Томска (в конце августа 2019 года) и резко сократившимся количеством полетов самолетов вблизи Томска в феврале–марте 2020 года. Тем не менее, полученные результаты позволяют предположить, что в регионах с плотным авиационным трафиком зеркальные самолетные следы и инициированные ими перистые облака формируются чаще. Последнее говорит о том, что микрофизические свойства таких аэрозольных образований должны изучаться более глубоко и учитываться при расчетах радиационного баланса атмосферы Земли.

Работа выполнена при поддержке Программы «Научный фонд имени Д.И. Менделеева Томского государственного университета» и при поддержке государственного задания Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН.

Список используемых источников

1. Радиационные свойства перистых облаков / под ред. Е.М. Фейгельсон. – М.: Наука, 1989. – 223 с.
2. Liou K.N. Influence of Cirrus Clouds on Weather and Climate Processes: A Global Perspective // Monthly Weather Review. – 1986. – Vol. 114. – P. 1167–1199.

3. *Shanks J.G., Lynch D.K.* Specular scattering in cirrus clouds // *Proc. SPIE.* – 1995. – Vol. 2578: Passive Infrared Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere III (27 December 1995). – P. 227–238. – Doi: 10.1117/12.228943.
4. *Nee E.V., Bryukhanova V.V., Doroshkevich A.A.* Dependence of polarization characteristics of the double scattering lidar return from liquid water content of clouds // *Proc. SPIE.* – 2016. – Vol. 10035. – Doi: 10.1117/12.2249277.
5. *Kärcher B.* Formation and radiative forcing of contrail cirrus // *Nat. Comm.* – 2018. – Vol. 9. – Doi: 10.1038/s41467-018-04068-0.
6. *Man's Impact on Climate* / W.H. Matthews, W.W. Kellogg, G.D. Robinson et al. – Cambridge: MIT Press, MA, USA, 1971.
7. *Grassl H.* Air Traffic and the Environment – Background, Tendencies, and Potential Global Atmospheric Effects (ed. Schumann U.). – Heidelberg [Germany]: Springer-Verlag, 1990. – P. 124–137.
8. *Bock L., Burkhardt U.* The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model // *J. Geophys. Res.: Atmos.* – 2016. – Vol. 121. – P. 3548–3565. – Doi: 10.1002/2015JD024475.
9. *Contrails, Cirrus Trends, and Climate* / P. Minnis, J.K. Ayers, R. Palikonda et al. // *J. Climate.* – 2004. – Vol. 17. – P. 1671–1685. – Doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<1671:CCTAC>2.0.CO;2.
10. *Girens K., Vazquez-Navarro M.* Statistical analysis of contrail lifetimes from a satellite perspective // *Meteorologische Zeitschrift.* – 2018. – Vol. 27, № 3. – P. 183–193. – Doi: 10.1127/metz/2018/0888.
11. *Дмитриева Т.М.* Атмосферные выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ от воздушных судов в пределах Российской Федерации: дис. канд. геогр. наук. – Томск, 2019. – 142 с.
12. *Flightradar24.* – URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 3.03.2020).
13. *Determining the backscattering phase matrix of an aircraft condensation jet* / I.V. Samokhvalov, I.D. Bryukhanov, I.V. Zhivotenyuk et al. // *Proc. SPIE.* – 2016. – Vol. 10035. – Doi: 10.1117/12.2249481.
14. *Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент* / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, В.А. Шишко и др. // *Оптика атмосферы и океана.* – 2019. – Т. 32, № 3. – С. 193–201.
15. *Свид. РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664453. Программа расчета параметров дрейфа конденсационных следов самолетов* / Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Локтюшин О.Ю. – Зарегистр. 7 ноября 2019 года.
16. *University of Wyoming.* – URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 3.03.2020).
17. *Исследование оптических характеристик перистых облаков с аномальным обратным рассеянием* / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, С.В. Насонов и др. // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 63–67.

В.Ю. Быков*;

Г.Н. Ильин*,

кандидат физико-математических наук;

Д.М. Караваев**,

кандидат технических наук;

Г.Г. Щукин**,

доктор физико-математических наук, профессор

*Институт прикладной астрономии Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

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

СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПАРООБРАЗНОЙ И ЖИДКОКАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ В ТРОПОСФЕРЕ

Рассмотрены методология применения метода наземной СВЧ радиометрии для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и некоторые результаты микроволнового эксперимента, проведенного в 2018 году в Ленинградской области.

Выполнены измерения собственного радиотеплового излучения атмосферы на частотах вблизи линии водяного пара 22,235 ГГц с использованием радиометра водяного пара Института прикладной астрономии Российской академии наук, установленного в геофизической обсерватории п. Лехтуси. Рассматриваются перспективы применения СВЧ радиометров для решения задач прикладной метеорологии.

Ключевые слова: геофизическая обсерватория, радиометр водяного пара, радиояркостная температура, влагозапас атмосферы, водозапас облаков.

ВВЕДЕНИЕ

Метод СВЧ радиометрии позволяет получать уникальную информацию о физическом состоянии атмосферы в режиме реального времени, поэтому данный метод находит все более широкое применение в различных областях в радиоастрономии, физике атмосферы и облаков, прикладной метеорологии, радионавигации.

Метод СВЧ радиометрии является эффективным методом измерения интегральных характеристик влагосодержания атмосферы, к которым относятся влагозапас атмосферы (интегральное содержание водяного пара) и водозапас облаков (интегральное содержание жидкокапельной влаги в облаках). Интерес к исследованиям характеристик влагосодержания атмосферы объясняется той значительной ролью, которую играет водяной пар атмосферы в формировании атмосферных процессов, процессов образования облаков и осадков; в развитии опасных явлений погоды, связанных с облаками, вследствие возникновения которых возрастает потребность в совершенствовании методов прогноза опасных явлений погоды.

Отечественные исследования в области радиотеплолокации или СВЧ радиометрии с целью решения задач метеорологии продолжают. Свое начало они берут в 60-х годах [1, 2, 4–7]. В 2018 году в геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, расположенной в п. Лехтуси Ленинградской области, был проведен микроволновый эксперимент с использованием радиометра водяного пара, разработанного в Институте прикладной астрономии Российской академии наук. Целью работы являлся предварительный анализ новых результатов измерений радиотеплового излучения атмосферы, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с помощью наземного радиометра водяного пара.

МЕТОДОЛОГИЯ ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Характеристики собственного радиотеплового излучения атмосферы (оптическая толщина, радиояркая температура) связаны с распределением метеорологических параметров в атмосфере в соответствии с уравнением переноса радиотеплового излучения в атмосфере [1, 13]. Поэтому существует принципиальная возможность определения характеристик влагосодержания облачной атмосферы исходя из измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы в СВЧ диапазоне. При этом оптимальные частоты зондирования находятся вблизи центра линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц и «окне прозрачности» атмосферы 31–38 ГГц. Для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков измерения радиояркой температуры атмосферы проводятся как минимум на двух частотах: около 20,6 ГГц или 23, ГГц и в «окне радиопрозрачности» атмосферы – около 36–37 ГГц или 31–32 ГГц. Двухчастотный радиометр позволяет также решать задачу измерения обусловленной водяным паром тропосферной задержки радионавигационных сигналов, которая определяется влагозапасом атмосферы [8, 11, 12].

Определение влагозапаса атмосферы $Q = \int_0^{\infty} \rho(z) \cdot dz$, водозапаса облаков $W = \int_{z_1}^{z_2} w(z) \cdot dz$, где

$\rho(z)$, $w(z)$ – профили абсолютной влажности воздуха и водности облаков, соответственно; z_1 , z_2 – высоты верхней и нижней границ облака, основано на связи этих параметров атмосферы с характеристиками собственного нисходящего радиотеплового излучения атмосферы. Первые эксперименты, выполненные в 1966 году в Ленинградской области с применением СВЧ радиометров, показали возможность определения влагозапаса атмосферы по радиотепловому излучению [2]. Последующие экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков выполняются в различных зарубежных и отечественных лабораториях, подтверждая эффективность применения наземных СВЧ радиометров для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

Для облачной атмосферы (при отсутствии осадков) влагозапас атмосферы (Q) и водозапас облаков (W) определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1 \tau(f_1) + a_2 \tau(f_2), \\ W &= b_0 + b_1 \tau(f_1) + b_2 \tau(f_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где a_i, b_i – коэффициенты регрессии, полученные по данным радиозондирования атмосферы и эмпирическим моделям облачности. Оптическая толщина атмосферы $\tau(f_i)$ связана с измеряемой радиояркой температурой $T_y(f_i)$ соотношением

$$\tau(f) = \ln \left(\frac{T_{\text{эфф}}(f) - T_{\text{к}}}{T_{\text{эфф}}(f) - T_y(f)} \right), \quad (2)$$

где $T_{\text{к}}$ – температура излучения космоса, 2,75 К;

$T_{\text{эфф}}$ – средняя эффективная температура атмосферы.

Теоретические оценки показывают, что погрешность определения влагозапаса атмосферы составляет около 5–10%, а водозапаса облаков – около 20–30% (при отсутствии осадков).

В период проведения экспериментов (2018) в Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков применялся радиометр водяного пара ИПА РАН [9]. Первые результаты микроволнового эксперимента обсуждались в работе [10]. Радиометр построен по классической схеме двухчастотного радиометра полной мощности с супергетеродинным приемником. Выбранные частотные характеристики радиометра близки к оптимальным для решения задачи раздельного определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков [1]. СВЧ радио-

метр включает два независимых канала «антенна – радиометрический приемник», каждый принимает излучение на отдельную рупорно-линзовую антенну, ширина луча диаграммы направленности антенны составляет около 6-7°. Системы термостатирования и «внутренней» калибровки радиометра обеспечивают возможность проведения длительных непрерывных измерений в автоматическом режиме.

Основные технические характеристики радиометра водяного пара (РВП) показаны в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики РВП

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Количество радиометрических каналов	2
2	Центральная частота каналов, ГГц	20,7; 31,4
3	Тип радиоприемного устройства	Супергетеродинный
4	Полоса усиления усилителя промежуточных частот, МГц	500
5	Ширина диаграммы направленности антенны по уровню 3 дБ, не более, град.	7
6	Флуктуационный порог чувствительности (при постоянной усреднения 1 сек), не более, К/с ⁰⁵	0,1
7	Калибровка, тестирование	Автоматическая
8	Предельная погрешность измерений радиояркостной температуры, К	± 2,5
9	Диапазон измеряемых радиояркостных температур, К	6–360
10	Темп измерений, с	5
11	Диапазон рабочих температур, °С	От -50 до +45
12	Потребляемая мощность, Вт	1000

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПЕРСПЕКТИВЫ

Эксперимент с применением СВЧ радиометра водяного пара проводился в геофизической обсерватории Лехтуси с 22 марта по 12 октября 2018 года [3, 10]. В период эксперимента тестировалась методика измерений радиояркостных температур в зенитном направлении с дискретностью 5 сек. Полученные данные радиояркостных температур на двух частотах записывались в суточные текстовые файлы данных с привязкой к шкале времени. Полученные ряды использовались для восстановления влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

Пример временного суточного хода влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков (12 июня 2018 года) приведен на рис. 1.

Видно, что в течение суток происходили существенные изменения влагозапаса атмосферы в интервале от 25 до 10 кг/м², а водозапас облаков испытывал значительные вариации, максимальные значения водозапаса облаков составляли около 2 кг/м². Качественно СВЧ радиометрические измерения влагозапаса атмосферы согласуются с независимыми наблюдениями удаленной (на расстояние около 40 км) станции аэрологического зондирования в п. Воейково, где уменьшение влагозапаса атмосферы за 24 ч составляло около 14,3 кг/м². Столь значительные изменения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, по всей видимости, обусловлены прохождением холодного атмосферного фронта. Для сравнения интересен случай наблюдения атмосферы 9 мая, когда суточные изменения влагозапаса безоблачной атмосферы составляли не более 1,8 кг/м² при относительно невысоких значениях влагозапаса атмосферы (около 7–9 кг/м²). Синоптическая ситуация определялась влиянием антициклона. Экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, выполненные различными авторами в различных регионах при различных метеоусловиях, показали, что метод наземной СВЧ радиометрии позволяет определять влагозапас атмосферы с высо-

кой точностью (СКО составляет около $0,5\text{--}1\text{ кг/м}^2$). Таким образом, выполненный эксперимент продемонстрировал возможности разработки РВП ИПА РАН для решения задач определения характеристик влагосодержания атмосферы.

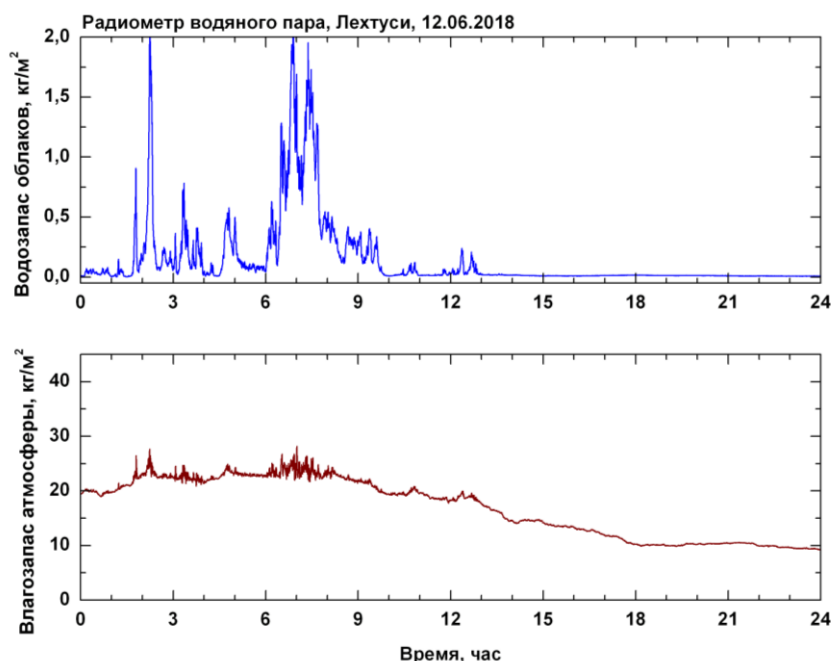


Рис.1. Пример суточного хода водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы

Перспективные направления применения наземной СВЧ радиометрии в прикладной метеорологии: наукастинг и сверхкраткосрочный прогноз опасных явлений, связанных с облаками; оперативный контроль тропосферной задержки радионавигационных сигналов; подспутниковые эксперименты и валидация спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы.

Дальнейшие исследования связаны с развитием и внедрением в практику метеорологических измерений методов сетевого СВЧ радиометрического влажностного и температурно-влажностного зондирования атмосферы. В Ленинградской области имеются определенные потенциальные возможности для развития региональной мезосети СВЧ радиометров для решения задач мониторинга атмосферы (наукастинга) и сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды, связанных с облаками, и отработки новых технологий анализа метеорологической обстановки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены метод СВЧ радиометрии для определения характеристик влагосодержания атмосферы и результаты микроволнового эксперимента, проведенного в 2018 году в Ленинградской области в Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского с применением радиометра водяного пара Института прикладной астрономии Российской академии наук. Получены новые экспериментальные данные измерений радиотеплового излучения атмосферы вблизи линии поглощения водяного пара на частотах 20,7 и 31,4 ГГц при различных метеоусловиях в Ленинградской области. Эти данные способствовали решению задач определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Выполненные исследования подтверждают возможности метода наземной СВЧ радиометрии

для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Среди перспективных направлений отмечены: применение методов СВЧ радиометрии для решения задач радионавигации, валидации спутниковой информации и сверхкраткосрочного прогноза погоды и опасных явлений, связанных с облаками.

Список используемых источников

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 253 с.
2. Рабинович Ю.И., Щукин Г.Г. Определение водяного пара в атмосфере по измерениям радиотеплового излучения // Труды ГГО. – 1968. – Вып. 222. – С. 62–73.
3. Состояние и перспективы создания Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского / И.А. Готюр, Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – № 662. – С. 184–187.
4. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 12. – С. 1122–1127.
5. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом / Е.Н. Кадыгров, А.Г. Горелик, Е.А. Миллер и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – № 6. – С. 459–465.
6. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. О точности определения влагосодержания при СВЧ-радиометрическом зондировании атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара 18–27 ГГц // Распространение радиоволн: труды XXVI Всероссийской открытой конференции. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. – Т. 2. – С. 254–257.
7. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. СВЧ-радиометрические исследования влагосодержания атмосферы в период развития конвективных облаков и гроз // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. – 2010. – Спецвыпуск. – С. 53–58.
8. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Метод микроволновой радиометрии в задачах тропосферной коррекции распространения радиосигналов глобальных навигационных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 2. – С. 48–51.
9. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени / Г.Н. Ильин, В.Ю. Быков, В.Г. Стэмпковский, А.М. Шишкин // Труды ИПА РАН. – 2013. – Вып. 27. – С. 210–215.
10. Результаты микроволнового эксперимента: перспективы радиометра водяного пара / В.Ю. Быков, Г.Н. Ильин, Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – № 670. – С. 150–153.
11. Estimation of the tropospheric wet delay of radio waves based on a model and microwave radiometry data / I.A. Gotur, D.M. Karavaev, V.M. Krasnov et al. // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 60, is. 3. – P. 200–206.
12. Ilyin G.N., Troitsky A.V. Determining the tropospheric delay of a radio signal by the radiometric method // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 60, is. 4. – P. 291–299.
13. Westwater E.R. Ground-based microwave remote sensing of meteorological variables: Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / edited by M. Janssen. – New York: John Wiley, 1993. – P. 145–213.

А.А. Бычков*,
кандидат физико-математических наук;
В.П. Корнеев*,
кандидат технических наук;
Н.А. Платонов*;
А.В. Частухин*,
кандидат физико-математических наук
*АНО «Агентство атмосферных технологий», г. Москва.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО ЗАЩИТЕ ОТ ЗАМОРОЗКОВ

Настоящая работа посвящена проблеме борьбы с таким опасным для сельского хозяйства явлением, каким являются заморозки. В Советском Союзе данной проблеме уделялось серьезное внимание и велись поиски решения данной проблемы. В последние три десятилетия такие работы практически не проводятся. Статья представляет собой попытку привлечь внимание к этой важной проблеме. Выполнен анализ методов и технических средств по борьбе с заморозками, с использованием разработанной трехмерной математической модели выполнены численные эксперименты по распространению аэрозольного облака для конкретных метеорологических ситуаций, имеющих место при заморозках, с учетом орографии местности разработана информационно-измерительная система управления работами по борьбе с заморозками. Элементы системы прошли натурные испытания на территории Республики Крым.

Ключевые слова: заморозки, сельское хозяйство, прогноз, методы воздействия, генератор дыма.

ВВЕДЕНИЕ

Метеорологические процессы и явления, такие как засуха, град, заморозки, представляют серьезную угрозу экономике. Изучению природы заморозков и средствам борьбы с ними всегда придавалось большое значение. Особенно актуальна проблема уменьшения вредного воздействия заморозков для таких отраслей народного хозяйства, как сельское хозяйство, лесное хозяйство, транспортная система.

Различают три типа заморозков: адвективные заморозки, радиационные заморозки и адвективно-радиационные заморозки. Условия погоды, благоприятствующие заморозку (большое эффективное излучение, слабый ветер), формируются в антициклонах и гребнях повышенного давления. Повторяемость заморозков возрастает в низменных местах рельефа, где задерживается охлажденный воздух. На интенсивность и продолжительность заморозков второго и третьего типов большое влияние оказывает местоположение (форма рельефа, характер подстилающей поверхности, близость водоемов и т. д.).

Исследования заморозков с целью разработки методов и технических средств воздействия для защиты сельскохозяйственных культур впервые в СССР были начаты в конце 30-х – начале 40-х годов [1]. Наиболее широко изучены и детально отработаны следующие способы борьбы с заморозками:

– способ открытого обогрева, заключающегося в повышении температуры растений и окружающего воздуха с помощью тепловых источников с применением твердого или жидкого топлива;

– способ борьбы с заморозками на основе перемешивания вышележащего и, следовательно, более теплого слоя воздуха с нижележащим слоем, в котором отмечаются отрицательные температуры [2, 4, 6];

– способы, основанные на использовании действия искусственного дождевания и орошения;

– способы борьбы с заморозками с помощью дымления. Этот способ хорошо обоснован в ГГО в 40-е – 50-е годы [5]. Большой цикл работ по созданию искусственных туманов для борьбы с заморозками проведен в НПО «Тайфун». Кроме того, в 90-х годах во ВНИИСХМ совместно с НИИПХ выполнены работы по созданию с помощью специальных пиротехнических средств (например, тепло-дымовой шашкой ТДШ-1) аэрозольного экрана для защиты от заморозков сельскохозяйственных культур, выращиваемых в закрытом грунте. Анализ результатов работ [3] по борьбе с заморозками, связанных с созданием дымовых завес, показал, что данный метод более рентабелен, чем, например, методы орошения и дождевания.

Следует отметить, что вопрос создания современных эффективных и экологически чистых технологий борьбы с заморозками по-прежнему актуален. Наиболее оптимальным подходом к выбору соответствующего метода борьбы с заморозками является дымление, т. е. создание дымовой завесы с использованием генераторов тумана.

КОМПЛЕКС ПО БОРЬБЕ С ЗАМОРОЗКАМИ

Прогноз возникновения и развития заморозков является необходимой частью обеспечения эффективной защиты растений от заморозков. Точность такого прогноза, который обычно дает бюро погоды Гидрометцентра (Гидрометеобюро), для больших территорий недостаточна, так как возникновение заморозков существенно зависит от местных условий, а ожидаемые минимальные температуры могут отличаться по территории в пределах 3–5 °С.

Современная эффективная и экологически чистая технология борьбы с заморозками подразумевает создание некоего автоматизированного (на первоначальном этапе – полуавтоматизированного) комплекса, включающего следующие элементы:

- оперативную информационно-измерительную систему (ОИИС);
- сеть генераторов аэрозоля (дыма, теплого тумана);
- оперативный пункт управления воздействиями (ОПУАВ).

Данная система в реальном времени позволит собирать всю информацию о метеопараметрах (о температуре и влажности воздуха, скорости и направлении ветра) на защищаемой территории.

Таким образом, использование автоматизированной системы контроля параметров метеонаблюдений и управления генераторами (необходимость мобильно переставлять генераторы в зависимости от направления ветра) позволит более эффективно проводить работы по предотвращению заморозков на защищаемых территориях.

Оперативная информационно-измерительная система (ОИИС) состоит из сети станций измерения характеристик окружающей среды, размещаемых на всей защищаемой от заморозков территории; блока приема и обработки информации, получаемой от сети станций по радиоканалу; ноутбука с программой, моделирующей метеорологическую обстановку.

Оборудование станций измерения характеристик окружающей среды должно удовлетворять следующим техническим требованиям: низкое энергопотребление, наличие набора интерфейсов подключения датчиков, простота в установке и обслуживании, перестраиваемые режимы работы. Анализ технико-экономических характеристик таких станций подтвердил, что оптимальными с точки зрения удовлетворения вышеперечисленным требованиям являются станции сбора характеристик окружающей среды, созданные в Агентстве АТТЕХ на платформе Arduino [7].

Блок-схема ОИИС представлена на рис. 1, а на рис. 2 показан внешний вид станции, которая осуществляет оперативное измерение температуры и передачу информации в ОПУАВ.

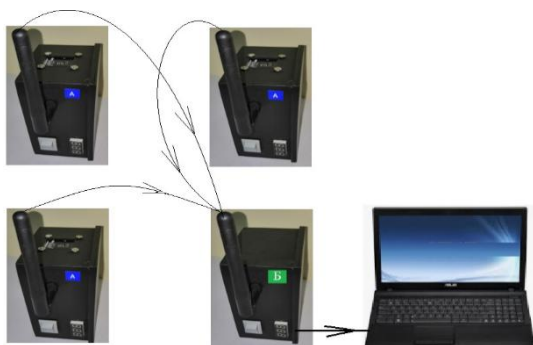


Рис. 1. Блок-схема ОИИС



Рис. 2. Внешний вид станции сбора характеристик окружающей среды

Сеть генераторов аэрозоля (дыма, теплого тумана) состоит из устройств, генерирующих достаточное количество дыма (аэрозоля) для создания дымовой завесы на всей защищаемой территории. В качестве примера на рис. 3 изображен пульсирующий аэрозольный генератор (ПАГ), который был использован при проведении натурных испытаний разработанного в агентстве АТТЕХ опытного образца комплекса по борьбе с заморозками.



Рис. 3. Пульсирующий аэрозольный генератор

Выбор пульсирующего аэрозольного генератора основан на ряде его характеристик: продолжительной работе, мобильности перемещения на автотранспорте и обильном процессе дымообразования.

Оперативный пункт управления воздействиями (ОПУАВ) представляет собой стационарный или мобильный пункт, располагающий двумя автоматизированными рабочими местами (АРМ) операторов воздействия и одним АРМ руководителя воздействия, которые оборудованы набором станций измерения температуры окружающей среды, метеокомплексом для измерения направления и скорости ветра, достаточным для защищаемой территории количеством генераторов аэрозоля дыма и мобильной связью.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ЗАМОРОЗКАМ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Испытания созданного в агентстве АТТЕХ опытного образца комплекса по борьбе с заморозками проводились в Крыму в октябре 2016 года.

Температура воздуха, направление и скорость ветра в пограничном слое измерялись с помощью метеокомплекса Davis. Для контроля за работой сети станций измерения температуры воздуха в приземном слое атмосферы использовались также спиртовые термометры. Ниже дано описание эксперимента, проведенного 29 октября 2016 года.

В 07:00 утра 29 октября 2016 года наблюдались заморозки, и по данным метеоконцентра Davis температура воздуха составляла около минус 2 °С при скорости ветра ~ 1 м/с.

Для выбора схемы размещения генератора аэрозоля и станций измерения метеопараметров с помощью разработанной в агентстве АТТЕХ трехмерной численной модели Frost было проведено численное моделирование процесса распространения струи нагретого воздуха с использованием данных наземных метеорологических наблюдений, полученных метеостанцией в Симферополе, и данных о вертикальном профиле ветра, полученных станциями радиозондирования в Одессе.

В результате численного моделирования были получены 3-мерные данные о поле распространения струи нагретого воздуха, а также были построены их вертикальные и горизонтальные сечения в различные промежутки времени после начала включения генератора аэрозоля. На рис. 4 в качестве иллюстрации показаны горизонтальное и вертикальное сечения поля распространения струи нагретого воздуха через 20 мин после включения генератора аэрозоля.

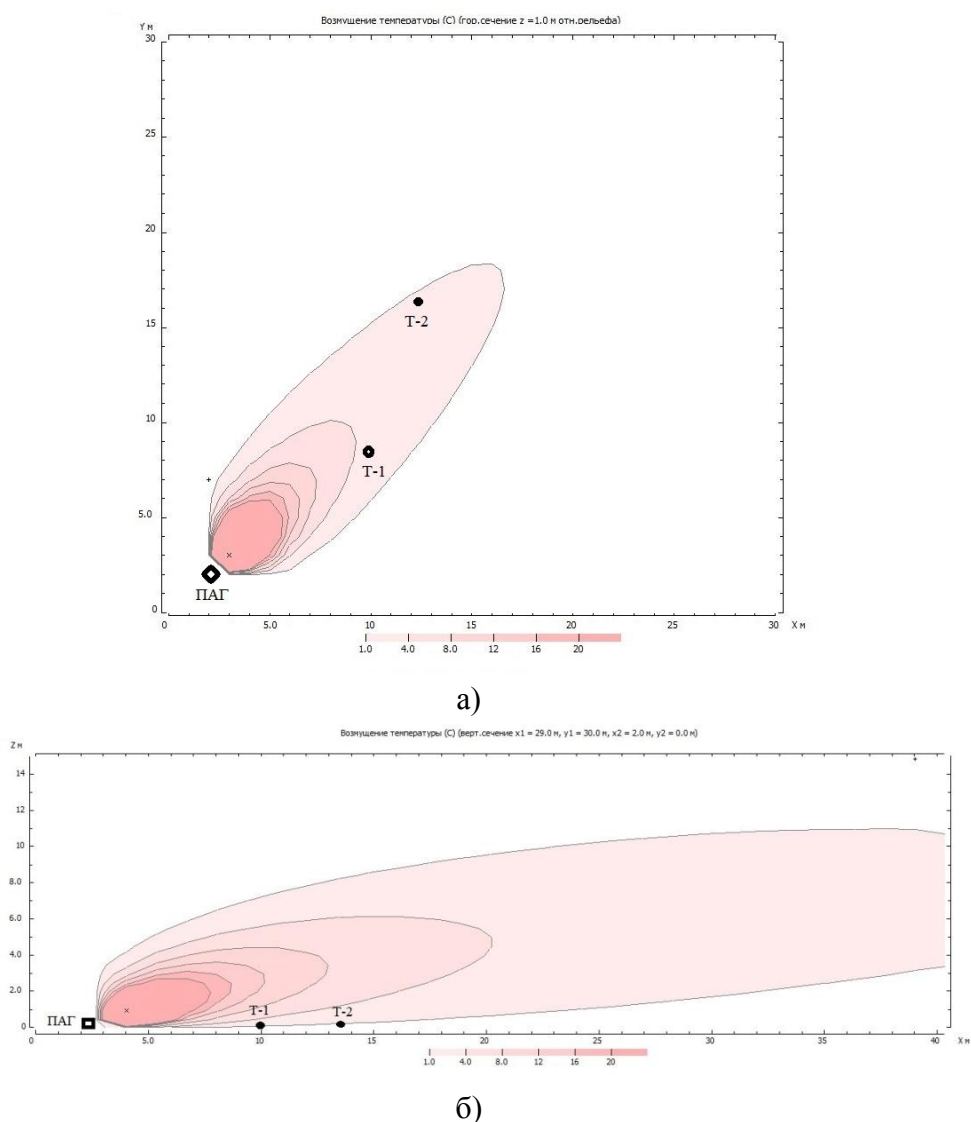


Рис. 4. Изображения поля распространения струи нагретого воздуха (°С):
а – горизонтальное сечение; б – вертикальное сечение

Как видно из рис. 4, через 20 мин после начала работы генератора ПАГ поле распространения нагретого воздуха (соответствующее увеличению температуры от 1 до 4 °С) достигло

станций измерения температуры воздуха Т-1 и Т-2, расположенных на удалении 6–10 м от генератора.

На основании полученных от ОИИС данных скорости и направления ветра на ОПУАВ, а также результатов моделирования были определены места расположения генератора ПАГ и станций измерения (рис. 5).

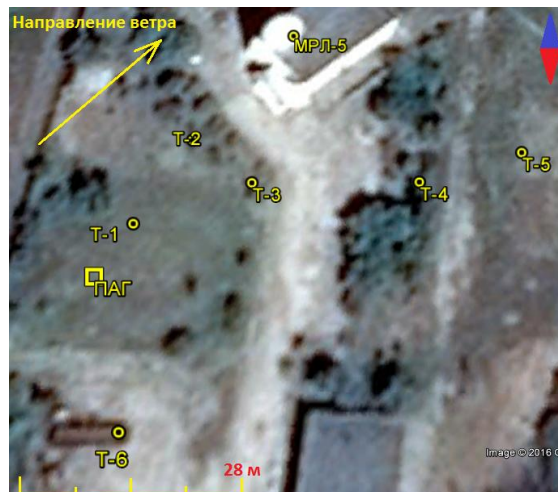


Рис.5. Расположение генератора ПАГ
(Т-1,Т-2,Т-3,Т-4,Т-5, Т-6 – станции измерения температуры воздуха)

Станции Т-5 и Т-6 использовались в качестве контрольных.

Запуск генератора ПАГ был осуществлен в 08:00. На рис. 6 показан процесс дымообразования через 5 и 10 мин после включения генератора.



Рис. 6. Работа генератора:
а – через 5 мин после включения; б – через 10 мин после включения

Результаты изменения температуры воздуха во время работы генератора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты изменения температуры воздуха

Время от начала работы ПАГ, мин	Т-1, °С	Т-2, °С	Т-3, °С	Т-4, °С	Т-5, °С	Т-6, °С	Примечание
0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-
5	1	0	0	-1	-1	-1	-
10	3	2	2	0	-1	-1	-
20	4	3	3	1	-1	-1	Генератор закончил работу
30	4	3	3	2	0	0	-
40	4	4	4	3	0	0	-
50	4	4	4	3	1	1	-

Как видно из табл. 1, через 5–10 мин после начала воздействия станции Т-1, Т-2 и Т-3, Т-4, установленные на удалении до 6–20 м от генератора, регистрировали увеличение температуры до плюс 2–3 градусов. При этом температура воздуха, измеренная контрольными станциями Т-5 и Т-6, была отрицательной до 8:40, после чего стал наблюдаться рост температуры в этих пунктах, связанный с прогревом земли за счет солнечной радиации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе натурных испытаний, проведенных в Крыму в октябре 2016 года, были подтверждены правильность выбранной концепции построения комплекса по борьбе с заморозками и работоспособность элементов созданного в агентстве АТТЕХ опытного образца такого комплекса.

Проведенная валидация численной модели распространения аэрозольного облака подтвердила возможность ее оперативного использования в работах по борьбе с заморозками для расчета схемы размещения генераторов аэрозоля и станций измерения метеопараметров.

Список используемых источников

1. Вольвач В.В., Мамаев Е.М. Способы и технические средства активного воздействия на заморозки в СССР и за рубежом // Активные воздействия на гидрометеорологические процессы: труды Всесоюзной конф. Киев, 1987 год. – Л., 1990. – С. 450–456.
2. Вольвач В.В., Мамаев Е.В., Матухно В.Н. Борьба с заморозками с помощью динамического воздействия на приземный слой воздуха // Метеорология и гидрология. – 1986. – № 7. – С. 102–109.
3. Берлянд М.Е., Красиков П.Н. Опыты по изучению методов дымления как средства борьбы с заморозками // Труды главной геофизической лаборатории. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – Вып. 12 (74). – С. 23–31.
4. Об опыте применения вертолета Ми-8 для борьбы с заморозками на территории Ара-ратской долины Армянской ССР / В.В. Вольвач, Р.С. Мкртчян, Е.М. Мамаев и др. // Труды ВНИИСХМ. – 1987. – № 22. – С. 119–130.
5. Берлянд М.Е. Теоретические основы защиты растений от заморозков путем дымовой завесы // Труды главной геофизической обсерватории. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – Вып. 12 (74). – С. 5–52.
6. Вольвач В.В. Динамическое воздействие на приземный слой воздуха как способ борьбы с заморозками // Труды ВНИИСХМ. – 1985. – № 15. – С. 33–44
7. URL: <https://iarduino.ru/shop/boards/Arduino/> (дата обращения: 6.03.2020).

Е.В. Волкова*,
кандидат географических наук;
А.В. Кухарский*;
Е.Л. Музылев**,
кандидат физико-математических наук;
З.П. Старцева**,
кандидат географических наук

* Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», г. Москва.

** Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММ ОСАДКОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ДЛЯ ЧАСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Разработан автоматизированный специализированный программный комплекс (АСПК) «ETR-plus», используемый в том числе для оценки суточных, месячных и годовых сумм осадков на обширных территориях по спутниковым данным. Основу АСПК составляет оригинальная комплексная пороговая методика (КПМ) детектирования облачности и идентификации ее типов по данным радиометров AVHRR/NOAA, MCSU-MP/Метеор-М № 2 и SEVIRI/Meteosat. С помощью КПМ по информации о максимальной в пределах пиксела мгновенной интенсивности осадков рассчитываются их суточные суммы, при суммировании которых за соответствующие промежутки времени вычисляются месячные и годовые суммы. Проверка точности расчета всех этих сумм производится путем сравнения полученных спутниковых оценок с данными наземных измерений, причем эта точность возрастает с увеличением промежутка времени суммирования осадков. Исследования проводились на примере части Центрально-Черноземного региона Европейской территории России площадью 227300 км². Сформированные с помощью АСПК поля сумм осадков могут использоваться при моделировании водного и теплового режимов исследуемых территорий.

Ключевые слова: АСПК «ETR-plus», суточные, месячные и годовые суммы осадков, КПМ, AVHRR/NOAA, MCSU-MP/Метеор-М, SEVIRI/Meteosat, модель LSM для расчета влагозапасов почвы и суммарного испарения

ВВЕДЕНИЕ

Информация о суммах осадков за различные промежутки времени часто бывает востребована при решении различных задач гидрологической, агрометеорологической и природно-ресурсной направленности, в частности, для расчета и прогноза стока с речных водосборов, оценки запасов почвенной влаги для конкретного региона, формирования оптимальных условий вегетации сельскохозяйственных культур, разработки методик оценки урожая, проведения мониторинга наводнений, засух и других экстремальных явлений и пр. Однако большая разреженность сети осадкомерных станций и неравномерность их распределения по площади резко сужают возможности постановки и эффективного решения подобных задач. Использование таких наблюдений за осадками со спутников позволяет существенно дополнить данные наземных измерений, а для некоторых регионов и заменить их.

В НИЦ «Планета» на примере части Европейской территории России (ЕТР) с координатами 46–63° с. ш. и 20–51° в. д. разработана технология оценки по спутниковым данным в оперативном режиме количества осадков за различные интервалы времени (сутки, месяц, год). Суточные суммы осадков $\Sigma I_{\text{сут}}$ рассчитываются при использовании разработанного автоматизированного специализированного программного комплекса (АСПК) «ETR-plus» с пространственным разрешением 1' (0,01667°) по широте и 1,5' (0,025°) по долготе [1] по информации о максимальной в пределах пиксела мгновенной интенсивности осадков I_{max} . Эта информация получается по данным измерений сканирующих радиометров SEVIRI с геостационарного космического аппарата (КА) Meteosat (точки стояния 0 и 41,5° в. д.),

AVHRR и МСУ-МР с полярно-орбитальных КА серии NOAA и Метеор-М №2 соответственно.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНОК ОСАДКОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

В основе АСПК лежит разработанная Е.В. Волковой оригинальная Комплексная Пороговая Методика (КПМ) получения в круглосуточном режиме информации об облачном покрове, осадках и опасных погодных явлениях по данным установленных на спутниках сенсоров. При использовании спутниковых измерений альбедо и радиационной температуры в разных спектральных каналах с помощью КПМ последовательно попиксельно дешифрируется облачный покров, затем производится его классификация и детектирование макро- и микрофизических параметров облачности.

Пороговые значения предикторов определяются с привлечением эмпирических функциональных зависимостей от высоты солнца, высоты места над уровнем моря, номера календарного дня (datd), угла спутникового визирования и др. Дополнительно в КПМ используются данные о рельефе и прогностическая информация о вертикальном распределении температуры воздуха в атмосфере и давлении на уровне моря.

Оценки I_{\max} в КПМ определяются по градациям (8-9 классов в зависимости от спутниковой информации), и при расчете значений $\Sigma I_{\text{сут}}$ берутся средние для всего диапазона значения I_{\max} . Сначала рассчитываются значения средней за сутки интенсивности осадков ($I_{\text{ср.сут}}$). При этом суммируются данные всех спутниковых наблюдений за I_{\max} в течение суток, в том числе для ситуации без осадков ($I_{\max} = 0$ мм/ч), и полученная сумма делится на количество этих наблюдений. Значения $\Sigma I_{\text{сут}}$ вычисляются по формуле: $\Sigma I_{\text{сут}} = a \cdot I_{\text{ср.сут}}$, где a – эмпирически полученный коэффициент, зависящий от datd. Месячные ($\Sigma I_{\text{мес}}$) суммы осадков получаются простым суммированием значений $\Sigma I_{\text{сут}}$, а годовые ($\Sigma I_{\text{год}}$) – суммированием значений $\Sigma I_{\text{мес}}$ за соответствующие временные интервалы.

Для настройки АСПК и контроля точности его выходных продуктов использовались значения $\Sigma I_{\text{сут}}$, $\Sigma I_{\text{мес}}$ и $\Sigma I_{\text{год}}$, полученные по данным наблюдений за 2011–2019 годы на 48 агрометеорологических станциях семи областей Центрально-Черноземного региона (ЦЧР) ЕТР с координатами 49–54° с. ш. и 31–43° в. д.

Сопоставление спутниковых оценок с данными наземных наблюдений производилось в границах фрагментов спутниковых изображений размером 3 x 3 пиксела каждого из радиометров с центром в месте расположения станции. Интенсивность осадков вычислялась как средняя по площади каждого из фрагментов для всех пикселов с осадками. Затем оценивались средние по региону значения $\Sigma I_{\text{сут}}$, $\Sigma I_{\text{мес}}$ и $\Sigma I_{\text{год}}$. Для оценок работоспособности методики рассчитывались среднее ($\text{dev} = \Sigma I_{\text{наземн.}} - \Sigma I_{\text{спутн}}$) и среднеквадратическое (СКО) отклонения спутниковых оценок ΣI от наземных.

Спутниковые оценки $\Sigma I_{\text{сут}}$, как правило, оказываются достаточно близкими к результатам наземных измерений (рис. 1), хотя минимальные значения $\Sigma I_{\text{сут}}$ практически всегда выше наземных, а максимальные часто ниже, т. е. происходит «сглаживание» спутниковых оценок относительно наземных данных.

Средние по региону и по станциям спутниковые оценки $\Sigma I_{\text{сут}}$ близки как между собой, так и к результатам наземных измерений. Значения $\Sigma I_{\text{сут}}$, определенные по данным SEVIRI, оказываются близкими к наземным, хотя и более сглаженными, чем полученные по данным AVHRR и МСУ-МР (значения dev и СКО больше по величине), так как спутниковые наблюдения равномернее распределены по времени суток и $I_{\text{ср.сут}}$ оценивается точнее. Таким образом, средние по небольшому региону спутниковые оценки $\Sigma I_{\text{сут}}$ по данным SEVIRI вполне способны заменить собой аналогичные оценки, полученные по данным осадкомерной сети.

Значения СКО обычно минимальны в холодные месяцы года и увеличиваются с наступлением теплого периода (рис. 2). Большие ошибки в этот период обусловлены большей интенсивностью осадков, а также их локальностью и малой продолжительностью.

В холодный период года абсолютные ошибки оценок $\Sigma I_{\text{сут}}$ меньше, чем летом, так как зоны выпадения осадков характеризуются значительной площадью, заметной продолжительностью и меньшей интенсивностью осадков, а также их большей однородностью в пределах каждой такой зоны.

При визуальном анализе больших фрагментов спутниковых изображений для отдельных дней часто отмечаются смещения положений максимумов и минимумов $\Sigma I_{\text{сут}}$ относительно фактических значений (рис. 3, а и б): для информации с полярно-орбитальных КА – из-за неравномерности поступления спутниковой информации в течение суток и больших перерывов между спутниковыми наблюдениями, а для данных с геостационарных КА – из-за смещения положения облаков относительно реального в зависимости от значений угла спутникового визирования и высоты верхней границы облака. Однако в окрестностях метеостанций практически всегда можно найти пикселы, спутниковые оценки осадков для которых близки к наземным.

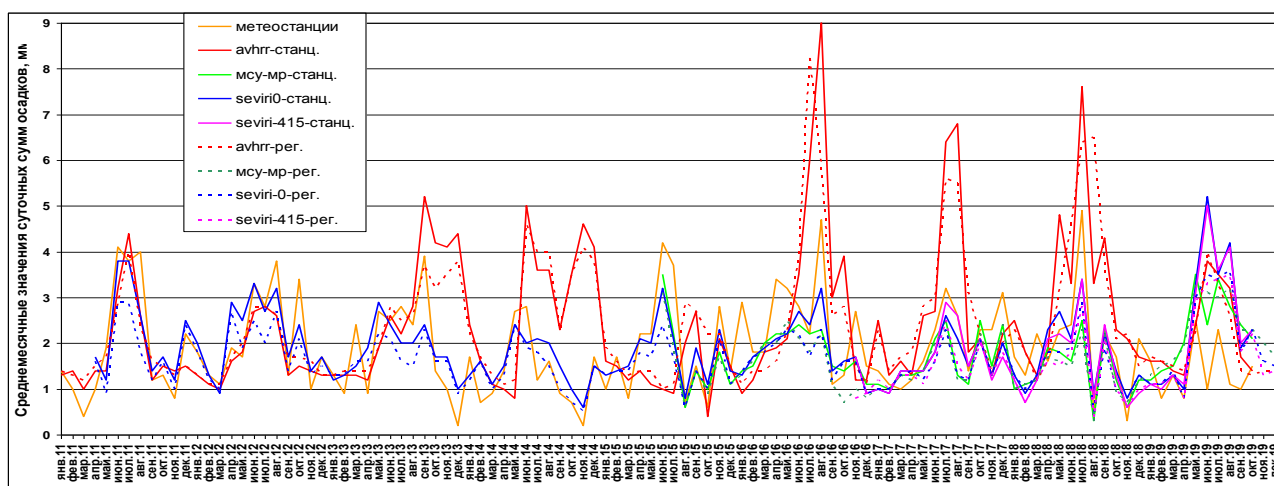


Рис. 1. Средние за месяц значения суточных сумм осадков $\Sigma I_{\text{сут}}$, измеренных на метеостанциях и определенных по спутниковым данным [осредненных по 48 метеостанциям (станц.) и по региону (рег.)]

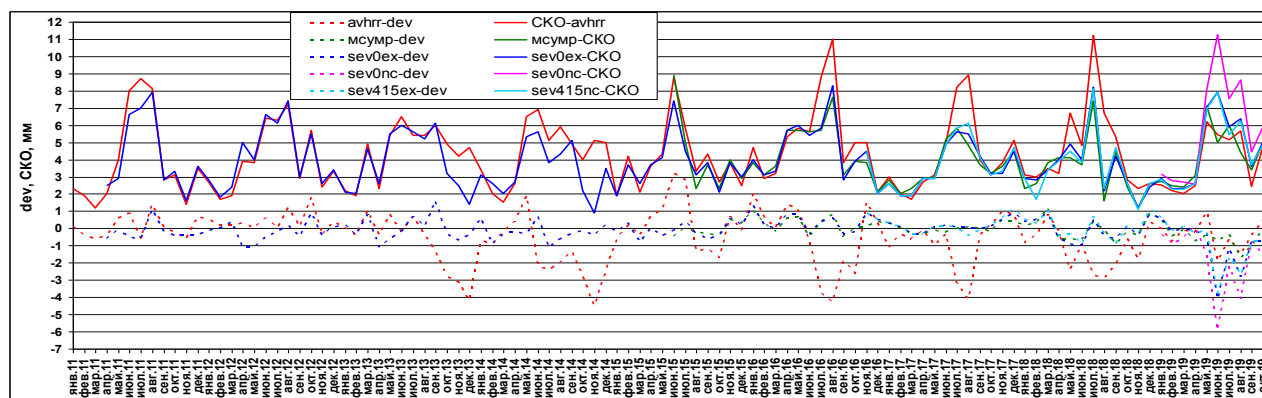


Рис. 2. Среднемесячные значения dev и СКО спутниковых оценок $\Sigma I_{\text{сут}}$ от наземных наблюдений или измерений

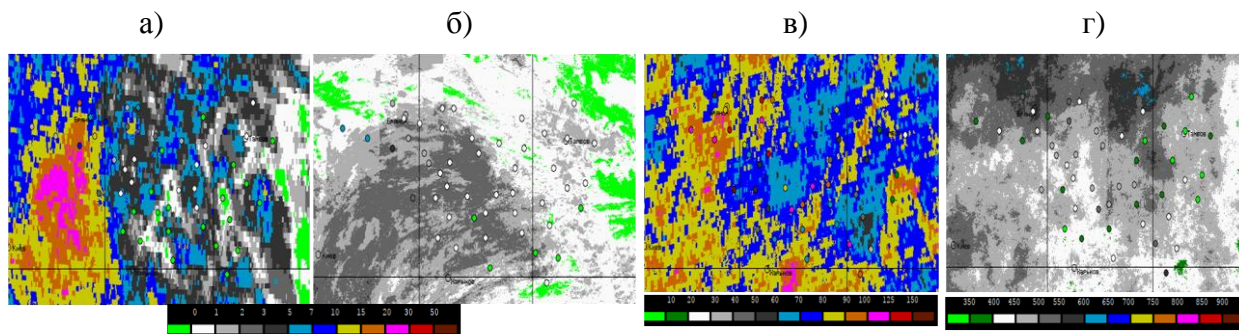


Рис. 3. Суточные (а, б), месячные (в) и годовые (г) суммы осадков (в мм), определенных по спутниковым данным SEVIRI/Meteosat-415 за 18 июля 2019 года (а); AVHRR/NOAA за 6 января 2019 года (б); SEVIRI/Meteosat-0 за май 2019 года (в); МСУ-МР/Метеор за 2019 год. В кружочках с использованием соответствующих цветовых шкал показаны значения $\Sigma I_{сут}$ (а, б), $\Sigma I_{мес}$ (в) и $\Sigma I_{год}$ (г)

Как и в случае суточных сумм осадков, определенные по спутниковым данным месячные $\Sigma I_{мес}$ (рис. 3, в, 4 и 5, а) и годовые $\Sigma I_{год}$ (рис. 3, г и 5, б) суммы, осредненные по площади региона, близки по значениям как к осредненным по 48 метеостанциям, так и к результатам наземных измерений. Аналогичные оценки по данным SEVIRI/Meteosat, будучи более «сглаженными», чем данные наземных наблюдений, тем не менее ближе к значениям последних, чем оценки, полученные по данным AVHRR/NOAA и МСУ-МР/Метеор. Средние СКО для $\Sigma I_{мес}$ и $\Sigma I_{год}$ составляют 20–40% от измеренной величины в зависимости от вида спутниковой информации.

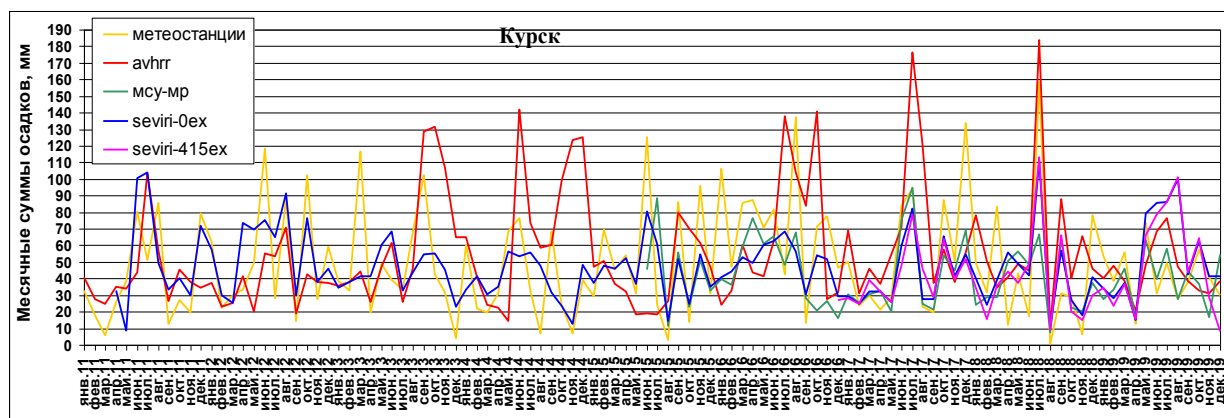


Рис. 4. Месячные суммы осадков, определенных по спутниковым данным и данным наземных измерений для агрометеорологической станции Курск (ЦЧР)

Анализ рисунков показывает, что для исследуемой территории ЦЧР спутниковые оценки $\Sigma I_{сут}$, $\Sigma I_{мес}$ и $\Sigma I_{год}$ хорошо согласуются с результатами наземных наблюдений.

Оценки количества осадков, полученные с помощью АСПК «ETR-plus», а также температур подстилающей поверхности и приземного воздуха, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью В, полученные с помощью СПК «ETR-tatets» [2], использовались при моделировании водного и теплового режимов обширных территорий, в том числе ЦЧР [3, 4]. Все названные величины являются входными переменными и параметрами разработанной в Институте водных проблем РАН модели взаимодействия подстилающей поверхности с атмосферой LSM (Land Surface Model), предназначенной для расчета

запасов почвенной влаги W , суммарного испарения Ev и других характеристик влаго- и теплообмена. Значения осадков, температур, LAI и B , рассчитывавшиеся в узлах вычислительной сетки модели размером 3×3 пиксела, вводились в модель в виде распределений по площади исследуемого региона. Также в узлах сетки производились вычисления значений W , Ev и других выходных величин (рис. 6). Погрешности оценки W и Ev при расчетах по модели относительно результатов их наземных измерений не превышали 15 и 25% (рис.7) [3, 4], что соответствует общепринятой величине ошибки определения значений W и Ev .

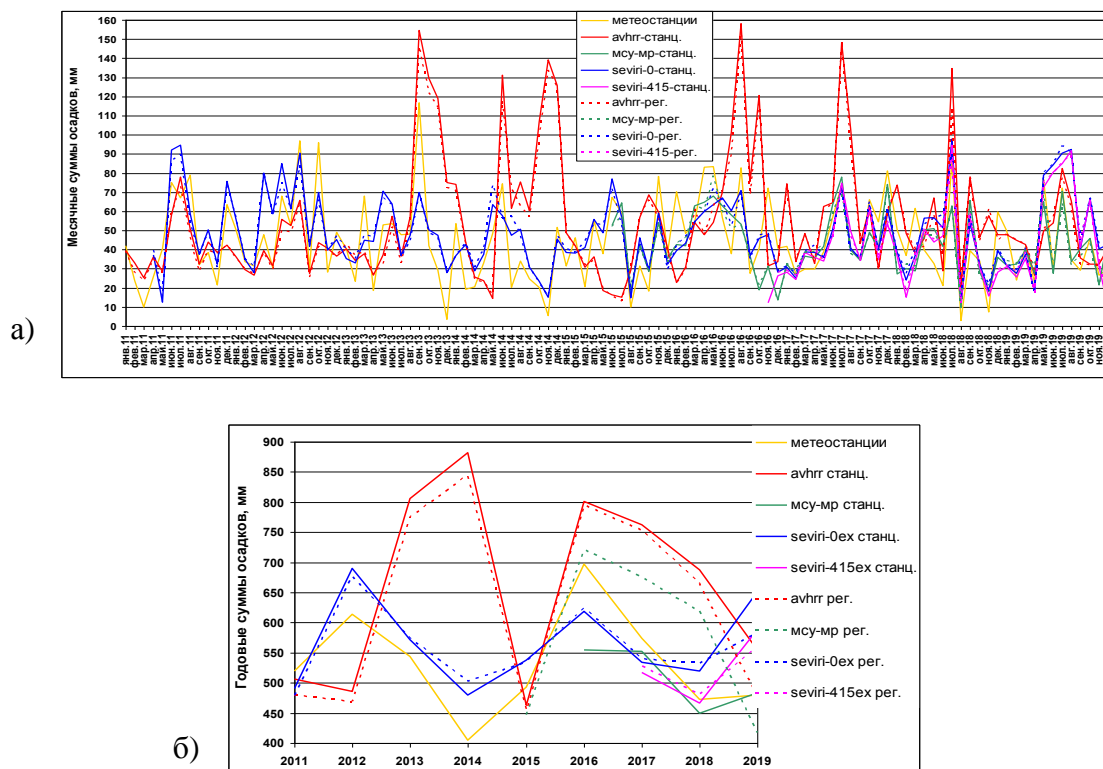


Рис. 5. Месячные (а) и годовые (б) суммы осадков, измеренных на метеостанциях и определенных по спутниковым данным [осредненных по 48 метеостанциям (станц.) и по региону (рег.)]

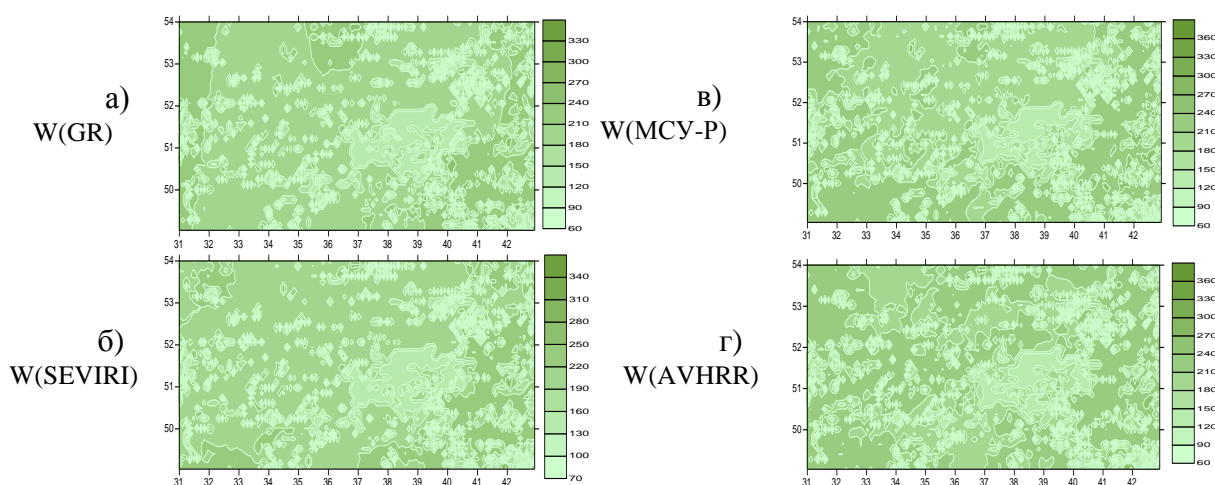


Рис. 6. Распределение по площади исследуемого региона значений влагозапасов метрового слоя почвы W (в мм) на 29 мая 2017 года, рассчитанных по модели при оценках суточных сумм осадков по данным наземных измерений W (GR) (а), по данным SEVIRI W (SEVIRI) (б), MCY-MP W (MCY-MP) (в) и AVHRR W (AVHRR) (г)

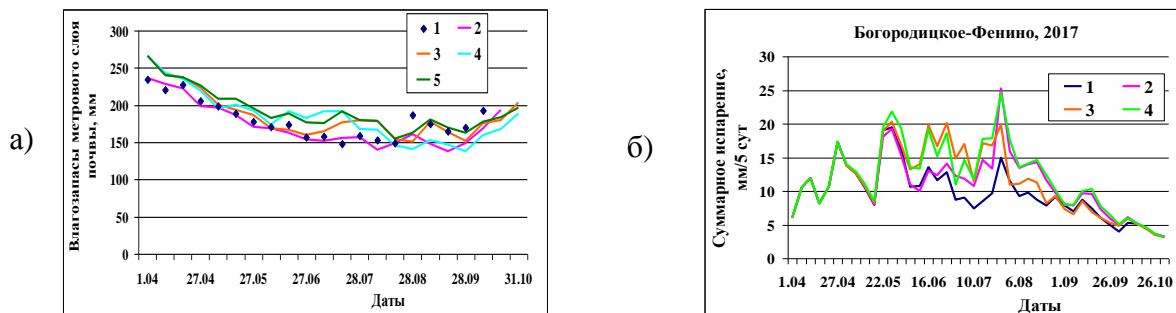


Рис. 7. Влагозапасы метрового слоя почвы (а): измеренные (1) и рассчитанные с помощью модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (2), SEVIRI (3), MCSU-MP (4) и AVHRR (5); суммарное испарение (б): рассчитанное с помощью модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (1), SEVIRI (2), MCSU-MP (3) и AVHRR (4). Агрометеорологическая станция Богородицкое-Фенино (ЦЧР). Сезон вегетации 2017 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный автоматизированный специализированный программный комплекс (АСПК) «ETR-plus», используемый в том числе для оценки суточных, месячных и годовых сумм осадков по спутниковым данным, показал возможность построения распределений количества осадков по площадям значительных размеров с высокой степенью вероятности. Так, при визуальном анализе полей значений этих сумм осадков хорошо видны места выпадения их максимального количества и минимального. При этом расхождения между спутниковыми оценками осадков и данными их наземных измерений уменьшаются с увеличением промежутка времени суммирования осадков, а также площади их осреднения. Применение выходных продуктов комплекса малоэффективно для «точечного» анализа, а также для интервалов времени менее суток.

Полученные с помощью АСПК оценки количества осадков могут использоваться для расчета по модели влаго- и теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой значений влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов исследуемых территорий. Совместное использование спутниковых оценок осадков с результатами прогноза состояния атмосферы (при их наличии) позволит проводить такое моделирование в режиме, близком к оперативному.

Список используемых источников

1. Волкова Е.В., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности, осадков, подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха для Европейской территории России // Сборник тезисов Семнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2019. – С. 163.
2. Волкова Е.В. Сравнение оценок температуры приземного воздуха, эффективной температуры и температуры почвы, полученных по данным разных спутниковых приборов для юга ЕТР // Сборник тезисов Семнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2019. – С. 162.
3. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий / Е.Л. Музылев, З.П. Старцева, А.Б. Успенский

и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 6. – С. 108–136.

4. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона / Е.Л. Музылев, З.П. Старцева, А.М. Зейлигер и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т.16, № 3. – С. 44–60.

И.А. Готюр*,
доктор технических наук, доцент;
А.Н. Мешков*;
М.Ю. Рудь*;
И.А. Яременко*

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

МЕТОД ПОИСКА ОЧАГОВ КУЧЕВО-ДОЖДЕВОЙ ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Одним из ключевых признаков развития опасных конвективных образований является идентификация куполообразных вершин над кучево-дождевой накопальной. В статье рассмотрен метод определения таких вершин на основе современной глубокой нейронной сети Mask R-CNN с использованием только спутниковых снимков. Вероятность обнаружения вершин составила 50–70%, частота ложного обнаружения 45–55%. Проведенные исследования показали перспективность дальнейшего развития метода. Авторами предложены основные направления для его усовершенствования.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственные нейронные сети, метеорология, метеорологические спутники, конвективные явления, опасные явления погоды.

ВВЕДЕНИЕ

С процессом конвекции связан целый комплекс опасных явлений погоды, которые могут привести к экономическим потерям и человеческим жертвам. Однако прогнозирование времени и места появления конвективного образования является сложной задачей. В связи с этим развитие методов, позволяющих повысить качество диагноза и прогноза таких явлений, имеет большое значение.

Одна из задач, способствующих определению появления и развития конвективных образований, заключается в идентификации куполообразных вершин над кучево-дождевой накопальной (*OT* – *overshooting top*), представляющих собой вторжение восходящего потока через его равновесный уровень и/или тропопаузу. Определение *OT* также является ключевым для идентификации таких сигнатур мощных штормов, как холодные кольцевые структуры (*Cold ring*) и U/V-образные области холода (*Cold-U/V* или *Enhanced-V*). Из-за опасности, ассоциированной с *OT* и указанными сигнатурами, их обнаружение обязательно при обработке данных, поступающих от геостационарных спутников в странах Европы и США.

Цель данного исследования – предложить метод определения *OT* по спутниковым снимкам на основе технологий искусственных нейронных сетей.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ *OT*

Одиночные *OT* существуют менее 30 мин и имеют небольшие размеры (< 15 км), что усложняет задачу их идентификации. Их обнаружение построено на основе характерных особенностей *OT* в различных диапазонах длин волн [9]. Основными при этом являются не зависящие от времени суток каналы инфракрасного диапазона.

На данный момент к наиболее известным и применяемым на практике методам относятся следующие: WV-IR BTД и *IRW* – *texture*. В методе WV-IR BTД за основу берется разность

значений яркостных температур в канале водяного пара (6-7 мкм) и инфракрасном канале (~11 мкм) [6, 7]. Вероятность обнаружения (*POD* – *probability of detection*) пикселей *OT* этим методом составляет 79,5%, частота ложного обнаружения (*FAR* – *false alarm rate*) пикселей – 75%.

При применении метода *IRW*-texture используется пространственный градиент яркостных температур (текстура) [3]. *POD* пикселей *OT* при наличии данных о тропопаузе из ЧПП составляет 75,4%, *FAR* пикселей – 16%, при их отсутствии, соответственно, – 92,1 и 60%.

В настоящее время, помимо традиционных, активно развиваются методы, основанные на технологии машинного обучения. Например, в работе [4] проводится сравнительный анализ нескольких техник машинного обучения для определения *OT* в тропических зонах по данным Himawari-8. При валидации лучшие результаты показала модель на основе случайного леса: *POD* для обнаружения области, содержащей *OT*, составила 77,06%, *FAR* для пикселей – 36,13%. В работе [5] для той же территории используется сверточная нейронная сеть, определяющая для участков снимка бинарное значение: *OT* или не-*OT*. Результаты работы сети: *POD* составила 79,68%, *FAR* – 9,78%.

Все указанные методы основаны на физических характеристиках *OT*, имеющих небольшие размеры, низкое значение яркостной температуры и куполообразную комковатую поверхность, приводящую к большим градиентам температур в этой области. Такого рода задачи относятся к задачам классификации, решение которых с помощью нейронных сетей в последнее время получило широкое распространение.

В данной статье предлагается использовать современную глубокую нейронную сеть Mask R-CNN, разработанную для решения задачи сегментации объектов на изображениях [2]. Под термином «сегментация объектов» понимается процесс определения пикселей, принадлежащих каждому объекту каждого класса по отдельности. Такая нейронная сеть позволяет не только определить принадлежность объекта к заданному классу, но и выделить ограничивающую его область.

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Для обучения нейронной сети был создан набор файлов с данными канала 11,2 мкм геостационарного спутника GOES-16 за период с 3 по 8 августа за промежуток времени с 16:00 до 18:30. Дневное время было выбрано для возможности дополнительного анализа с использованием информации в видимом диапазоне. Центральная часть каждого изображения была разделена на участки размером 500 x 500 пикселей и 300 x 300 пикселей, при этом крайние области, имеющие большие геометрические искажения, не использовались.

Обычно для моделей глубокого обучения нужны огромные объемы входной информации, но в описанном эксперименте обучение происходило с использованием весовых коэффициентов, полученных при обучении Mask R-CNN на наборе данных COCO. Файл весовых коэффициентов был доступен вместе с кодом нейронной сети [2].

Значения яркостных температур меньше 215 К были не приняты во внимание как не представляющие интереса при идентификации *OT*. Массивы яркостных температур были представлены в виде индексированных изображений, где каждому значению температуры назначался определенный цвет. При этом применялась стандартная шкала, используемая для отображения конвективных явлений погоды в инфракрасном спектре.

Маска *OT* была сформирована автоматически для каждого файла с помощью метода *IRW*-texture и отредактирована с привлечением канала высокого разрешения 0,64 мкм. Полученные маски выделяют на спутниковых снимках два класса объектов: фон и *OT*.

Пример фрагмента снимка и маски представлен на рис. 1.

Подготовленные снимки и соответствующие им маски были разделены случайным образом на три набора: обучающий, валидационный и тестовый (табл. 1).

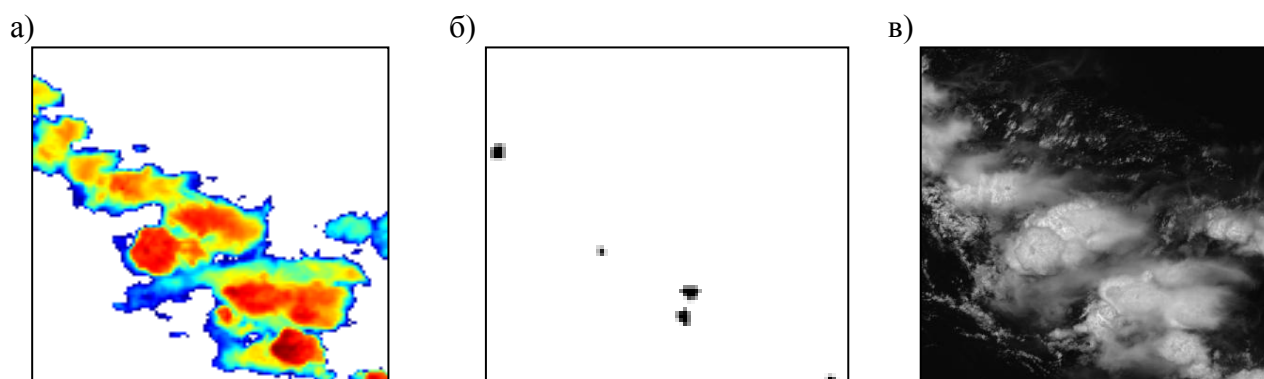


Рис. 1. Фрагмент снимка GOES-16, используемого при обучении:
а – канал 11,2 мкм; б – маска ОТ; в – канал 0,64 мкм

Таблица 1

Статистические характеристики наборов данных

Набор снимков и соответствующих им масок		Обучающий		Валидационный		Тестовый	
Размер снимка		500x500	300x300	500x500	300x300	500x500	300x300
Всего снимков		154	30	59	5	6	5
Всего ОТ		1342	86	534	18	58	17
Число ОТ на снимке	Мин.	1	1	1	1	3	1
	Ср.	8.7	2.9	9.1	3.6	9.7	3.4
	Медиана	7	2	7	3	10.5	4
	Макс.	44	9	3.7	7	14	5
Площадь ОТ (пикселей)	Мин.	1	1	1	1	1	1
	Ср.	17.19	14.94	16.86	16.67	16.93	9.82
	Медиана	16	15.5	16	16	16	6
	Макс.	49	42	49	36	42	25

С целью использования Mask R-CNN при решении задачи определения ОТ были реализованы модули для загрузки спутниковых данных и соответствующих им масок и модули для настройки и запуска нейронной сети [<https://github.com/smeyashka/science>].

Обучение происходило в течение 40 эпох, по 100 шагов каждая. При этом первые 15 эпох происходило обучение только верхних слоев сети для адаптации к новому классу объектов, в оставшиеся же эпохи обучались все ее слои.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В процессе обучения нейронная сеть относит участок изображения к одному из заданных классов с некоторой вероятностью – степенью уверенности. При конфигурации задается порог – значение вероятности, при превышении которого класс считается определенным верно.

На рис. 2 представлен результат определения ОТ с порогом 0,7 для фрагмента снимка из валидационного набора. На этом фрагменте представлено два верно определенных участка ОТ и один ложный. Число перед дробью обозначает степень уверенности нейронной сети, после дроби – уровень перекрытия масок ОТ.

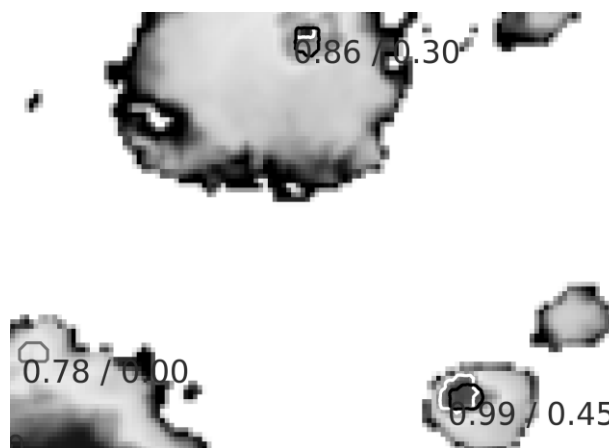


Рис. 2. Результат определения OT с порогом 0,7

Для оценки результата в работе были использованы вероятность обнаружения области OT – POD

$$POD = \frac{\text{Число верно обнаруженных областей } OT}{\text{Число эталонных областей } OT} \quad (1)$$

и частота ложного обнаружения области OT – FAR

$$FAR = \frac{\text{Число ложных областей } OT}{\text{Число обнаруженных областей } OT} \quad (2)$$

При определении POD принималось, что обнаруженные области OT считаются верными, если они хотя бы частично занимают эталонные области.

Метрики были рассчитаны для тестового и валидационного наборов. Помимо этого в качестве обобщенного параметра рассчитывалась метрика F-мера, представляющая собой гармоническое среднее между полнотой и точностью классификации [10].

Сравнение результатов для обоих наборов при одинаковых начальных конфигурациях показало, что сеть хорошо выполняет обобщение. Следует отметить общую для всех методов тенденцию, прослеживаемую и в результатах проведенных экспериментов: изменение параметров модели, ведущее к увеличению POD , одновременно ведет и к увеличению FAR . При этом уровень изменения может быть разным. Соответственно, при практическом использовании необходимо делать выбор между полнотой и вероятностью ложных обнаружений OT , подбирая оптимальные для конкретной задачи условия.

Анализ результатов показал, что ложное обнаружение происходит на участках с большими градиентами, которые принадлежат развивающейся кучевой облачности, деградирующим вершинам и краям облачности.

Результат расчета для нескольких эпох при порогах от 0,5 до 0,9 представлен на рис. 3.

Как видно из графиков, на всех эпохах увеличение порога, ведет как к уменьшению ложных обнаружений (рис. 3,в и 3,г), так и к уменьшению вероятности верного обнаружения OT (рис. 3,а и 3,б). Также можно отметить высокие значения FAR при пороге меньше 0,6 и довольно резкое уменьшение обоих параметров при пороге больше 0,8. Наиболее низкие значения POD алгоритм демонстрирует на 21-й эпохе обучения. При этом показатель FAR хуже, чем на 38-й эпохе и не намного лучше, чем на 34-й и 40-й эпохах, что ведет к наиболее низкому показателю F-меры (рис. 3,д и 3,е). Это говорит о недостаточной обученности нейронной сети на 21-й эпохе. Можно отметить, что значение F-меры для большинства порогов лучше для 38-й эпохи, чем для 34-й. Наибольших значений POD достигается на 40-й эпохе. При этом уровень FAR тоже оказывается высок, но сопоставим с FAR на 34-й эпохе, что подтверждает и более высокое значение F-меры на всех участках кривой. Соответственно, использование весов на 40-й эпохе обучения будет предпочтительнее. При сравнении результата 38-й и 40-й эпох такой однозначности не прослеживается. Для текущего результата можно рекомендовать использование весов 40-й эпохи, если более важным является макси-

мальное число обнаружений *ОТ*, и весов 38-й эпохи, если важнее уменьшить число ложных *ОТ*. Из всего вышесказанного следует, что наиболее сбалансированными являются результаты 38-й и 40-й эпох при порогах 0,6–0,8.

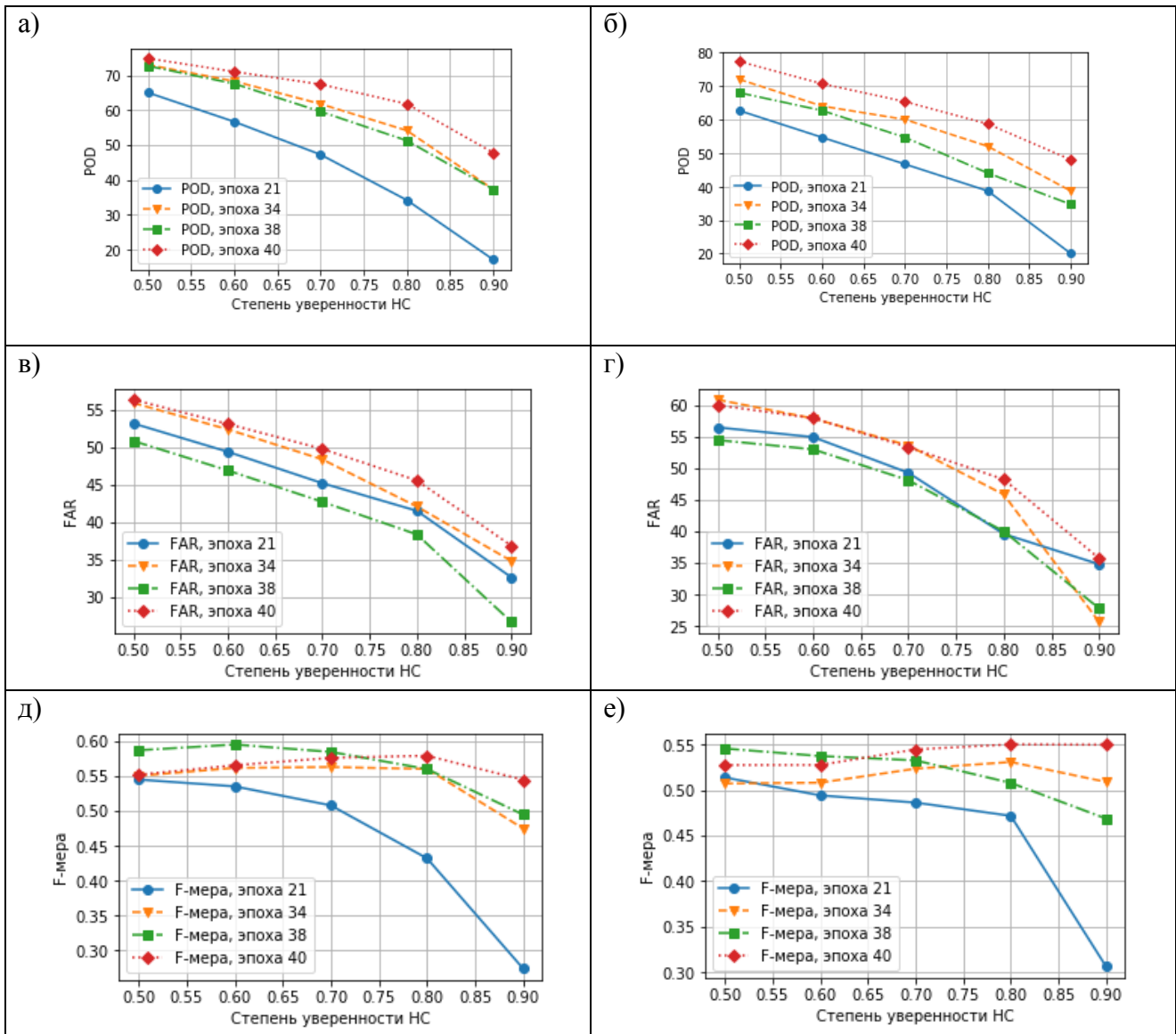


Рис. 3. Вероятность обнаружения *ОТ*:
 а – для валидационного набора; б – для тестового набора;
 в – для валидационного набора;
 г – для тестового набора; д – для валидационного набора;
 е – для тестового набора

Можно предположить, что увеличение числа эпох приведет к некоторому улучшению показателей, но авторы считают, что для качественного изменения результата необходимо доработать набор исходных данных. Также можно привлечь дополнительные данные. К примеру, в работах Bedka [9] было показано, что отсутствие данных о тропопause ведет к увеличению *FAR* в несколько раз, соответственно, можно предполагать, что использование этой информации в предлагаемом методе может привести к существенному снижению ложных обнаружений. Кроме того, необходимы дополнительные эксперименты по изменению конфигурации нейронной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод определения *ОТ* с помощью нейронной сети Mask R-CNN. Сравнение результатов показало, что применение нейросетевых технологий позволяет определять *ОТ* на уровне, сопоставимом с традиционными методами. При этом существует возможность развития предложенного метода, что должно привести к повышению точности классификации. К достоинствам также можно отнести возможность изменения порога для регулирования чувствительности метода.

В дальнейшем планируется использовать информацию о температуре тропопаузы, провести эксперименты при использовании нескольких каналов радиометра. Кроме того, планируется увеличить размер набора данных для повышения точности и проверки на большем количестве случаев образования *ОТ*. К тому же можно предположить перспективность исследований по определению с помощью нейронных сетей областей холодных кольцевых структур и U/V-образных областей холода.

Список используемых источников

1. *Спрыгин А.А., Прохарева А.А.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2018. – №3(369). – С. 6–22.
2. *He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R.* Mask R-CNN. arXiv:1703.06870v3 (2018)
3. Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients / K. Bedka, J. Brunner, R. Dworak et al. // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2010, 49, 181–202.
4. *Kim M., Lee J., Im J.* Deep Learning-based Monitoring of Overshooting Cloud Tops from Geostationary Satellite Data // GIScience & Remote Sensing. – 2018. – Vol. 55. – Doi: 10.1080/15481603.2018.1457201.
5. Detection of Tropical Overshooting Cloud Tops Using Himawari-8 Imagery / M. Kim, J. Im, H. Park et al. // Remote Sensing. 9. 685. – 2017. – Doi: org/10.3390/rs9070685.
6. *Setvak M., Rabin R. M., Wang P. K.* Contribution of the MODIS instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in GOES and MSG imagery. 2007. // Atmos. Res. – 2007. – Vol. 83. – P. 505–518.
7. Monitoring deep convection and convective overshooting with METEOSAT / J. Schmetz, S. A. Tjemkes, M. Gube, L. van de Berg // Adv. Space Res. – 1997. – P. 433–441.
8. Algorithm Theoretical Basis Document for the Convection Product Processors of the NWC/GEO. – URL: http://www.nwcsaf.org/Downloads/GEO/2018/Documents/Scientific_Docs/NWC-CDOP2-GEO-MFT-SCI-ATBD-Convection_v2.1.pdf (дата обращения: 5.03.2020).
9. Objective Satellite-based Overshooting Top and Enhanced-V Signature Detection. – URL: https://www.eumetsat.int/website/home/Data/Training/TrainingLibrary/DAT_2042886.html (дата обращения: 5.05.2020).
10. F1_score. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/F1_score (дата обращения: 5.05.2020).

И.А. Готюр*,
 доктор технических наук, доцент;
 А.Н. Мешков*;
 М.Ю. Рудь*;
 И.А. Яременко*

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

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены подходы к использованию технологий машинного обучения в системе гидрометеорологического обеспечения. Необходимость обращения к новым технологиям вызвана недостаточной точностью, недостаточной адаптивностью к географическим особенностям, а также избыточно сложной интегрируемостью новых данных в существующие подходы: статистические и гидродинамические. Кроме того, технологии машинного обучения могут быть использованы для поиска новых взаимосвязей и извлечения новых знаний из существующих данных.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственные нейронные сети, метеорология, автоматизация обработки гидрометеорологической информации.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, по данным аналитиков Gartner, занимающихся анализом популярных и востребованных технологий, происходит спад завышенных ожиданий от технологий машинного обучения. В то же время эти технологии остаются востребованными и во многих областях деятельности человека не до конца изученными.



Рис. 1. График ожиданий от популярных технологий

Кривая, представленная на рис. 1 [1], наглядно показывает путь, который проходят все новые технологии. После создания внимание общества к ним возрастает, от технологий ожидают решения всех насущных проблем человечества. Далее происходит апробация, испытание в действии, появляются первые разочарования, приходит понимание, что эти технологии не решают всех проблем и необходимы дальнейшие исследования. Если технология преодолевает кризис, связанный с разочарованием, и поиск новых областей ее применения дает положительные результаты, тогда уже она выходит на стадию продуктивности, когда начинается осознанное внедрение новой технологии в различные отрасли деятельности человека.

Из рис. 1 видно, что по отношению к технологиям машинного обучения на момент 2019 г. уже наблюдается коррекция завышенных ожиданий. Это говорит о том, что по данным аналитиков достижение продуктивности технологии наступит через 5 лет. Стоит отметить, что разные технологии имеют разное время достижения продуктивности, для каких-то технологий это время составляет 2 года и менее, для других – более 10 лет, а какие-то могут устареть еще до выхода на линию своей продуктивности.

Быстрые темпы развития технологий обуславливаются в том числе и тем, что лучшие разработки крупнейших корпораций в области машинного обучения открыты для общественности и позволяют получить наглядные результаты «здесь и сейчас». Так, толчок в популяризации и развитии технологий машинного обучения дало решение об открытии исходного кода фреймворка TensorFlow корпорацией Google, затем корпорация Microsoft открыла исходный код среды для распределенного обучения нейросетевых моделей, «Яндекс» открыл исходный код алгоритма машинного обучения CatBoost, за ними последовали и другие корпорации, занимающиеся разработками в области искусственного интеллекта и машинного обучения.

В настоящее время назрела необходимость создания более простых в использовании подходов, которые могли бы быть применены не только экспертами в области машинного обучения, но и человеком, столкнувшимся с необходимостью решения той или иной задачи. Зачастую использование систем машинного обучения предполагает выполнение полного цикла прикладных исследовательских работ по предварительной обработке данных, выделению признаков, выбору вида модели, обучению параметров.

Цель настоящей публикации – обзор актуальных приемов, технологий и методик, применяемых при решении прикладных задач машинного обучения, в области гидрометеорологии.

Изобилие инструментов, алгоритмов и фреймворков для машинного обучения в значительной степени повлияло на расширение сферы применения новой технологии.

ТЕХНОЛОГИИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В рамках данной статьи под машинным обучением будем понимать раздел искусственного интеллекта, изучающий методы построения алгоритмов через индуктивное обучение. Все задачи, решаемые с помощью этой технологии, относятся к одному из следующих классов:

1) задачи регрессии – прогноз на основе выборки объектов с различными признаками. Выходными значениями будут вещественные числа, например температура воздуха, давление на уровне моря или количество осадков;

2) задачи классификации – получение категориального ответа на основе набора признаков. Имеет конечное количество ответов: прогнозируется ли в ближайший час выпадение осадков, превысит ли скорость ветра пороговое значение или нет;

3) задачи кластеризации – распределение данных на группы: тип явления в зависимости от видимости (слабая дымка, дымка, туман, густой туман), тип барического образования или стадия циклона;

4) задачи уменьшения размерности – сведение большого числа признаков к меньшему для последующей визуализации или кодирования (например, сжатие данных);

5) задачи выявления аномалий – отделение аномалий от стандартных случаев. На первый взгляд эти задачи совпадают с задачами классификации, но есть одно существенное отличие: аномалии – явление редкое и обучающих примеров, на которых можно обучить модель выявлять такие объекты, либо слишком мало, либо просто нет, поэтому методы классификации здесь не работают. Примером таких задач может являться выявление искажений в передаче гидрометеорологических данных.

Примером прикладных задач, решаемых в целях гидрометеорологического обеспечения, могут являться:

- 1) восстановление значений метеорологических величин в точке, а также профиля значений по данным дистанционного зондирования Земли;
- 2) прогноз метеорологических величин;
- 3) корректировка прогностических полей метеорологических величин;
- 4) идентификация аномальных значений метеорологических величин;
- 5) прогноз траекторий перемещения барических образований;
- 6) прогноз перемещений и эволюций зон с опасными явлениями погоды;
- 7) оценивание работы моделей;
- 8) классификация метеорологических явлений и атмосферных образований;
- 9) реконструкция неполных временных и пространственных рядов;
- 10) постобработка ансамблевых прогнозов;
- 11) прогноз климатических изменений;
- 12) текущий и краткосрочный прогноз.

В международном научном сообществе ведется активная работа по поиску решений этих задач с использованием технологий машинного обучения [3, 4, 5]. В частности, исследователями из Google Research [6] разработана нейронная сеть MetNet для прогнозирования осадков с пространственным разрешением 1 км и интервалом от 2 мин до 8 ч. MetNet превосходит современную физическую модель, используемую NOAA для прогнозирования осадков с заблаговременностью 7-8 ч. Неоспоримым преимуществом предложенной авторами модели искусственной нейронной сети (ИНС) является то, что расчет прогнозов занимает несколько секунд, а не часов, как в физической модели NOAA.

ОБРАБОТКА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Существуют следующие подходы к обработке гидрометеорологических данных и прогнозированию метеорологических величин и явлений: гидродинамические, физико-статистические и динамико-стохастические [2]. При построении физико-статистических моделей предикторы выбираются исходя из некоторых физических соображений, а закон отображения множества предикторов на множество предиктантов устанавливается эмпирическим путем. Те же закономерности лежат и в основе технологий машинного обучения, где на основе существующей выборки исходных данных путем автоматизированного подбора параметров обучения модели ИНС производится поиск наиболее оптимального закона отображения множества предикторов на множество предиктантов.

При построении физико-статистических моделей [2] используется следующее правило отображения вектора предикторов \hat{X} на вектор предиктантов \hat{Y} :

$$\hat{Y}_{\langle n \rangle} = F_{[n,m]} \hat{X}_{\langle m \rangle} + \widehat{\Delta}_{\langle n \rangle}, \quad (1)$$

где n – количество предиктантов;
 m – количество предикторов;
 $\widehat{\Delta}_{\langle n \rangle}$ – случайный вектор ошибки прогноза.

Данный подход зарекомендовал себя при метеорологическом обеспечении [14, 15] и обладает простотой применимости и адаптации.

Рассмотрим структуру подхода к моделированию процессов машинного обучения и ее применимости при гидрометеорологическом обеспечении.

В общем случае работа с технологиями машинного обучения состоит из этапов, показанных на рис. 2:

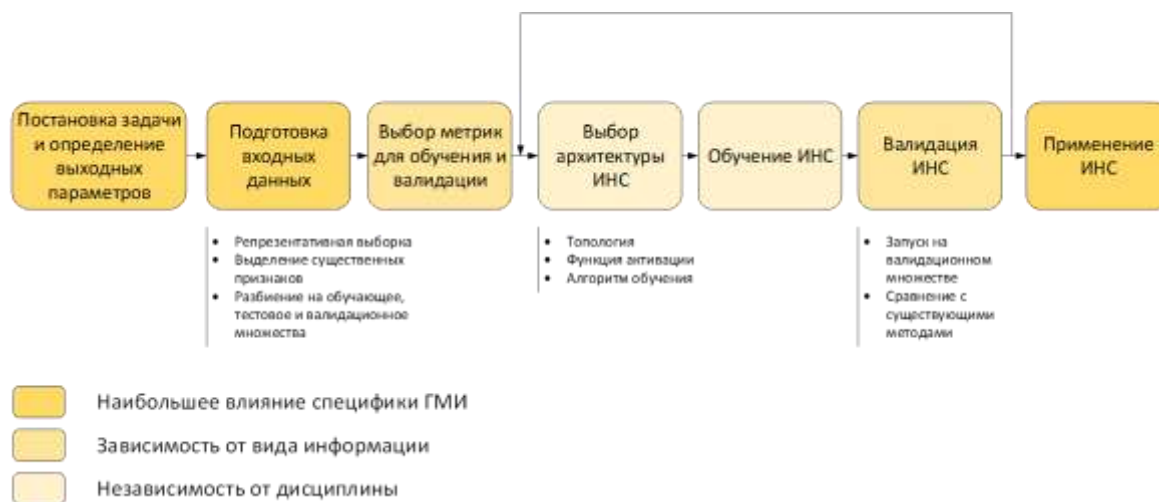


Рис. 2. Алгоритм работы с ИНС

Отслеживание тенденций в изменении метеорологических величин важно для поиска закономерностей и корреляций между ними. Для обработки временных рядов хорошо себя зарекомендовали в практике следующие типы искусственных нейронных сетей: LSTM [7], RNN [8], Convolutional [9], MLP [10].

После постановки задачи необходимо определенным образом подготовить данные. Гидрометеорологическая информация, как правило, передается в закодированном виде, поэтому необходимо ее раскодировать и представить в удобном для долгосрочного хранения виде, например записать в базу данных (БД). Далее она может быть легко извлечена и подвержена дальнейшей обработке – представлению в том виде, который необходим для работы модели, а именно, упорядоченном и нормализованном [11].

Так же как и при физико-статистическом подходе, необходимо выделить из массива данных наиболее значимые признаки, например температуру воздуха, влажность, метеорологическую дальность видимости, время восхода и захода солнца для прогнозирования метеорологических явлений, ухудшающих видимость. Пусть X – множество значимых признаков, Y – множество значений искомых величин. Тогда требуется найти неизвестную функциональную зависимость:

$$f_{xy} = X \rightarrow Y, \quad (2)$$

значения которой известны для обучающего множества X^{train} , но априори не известны для всего множества X .

Для проверки качества аппроксимации целевой функции вводятся следующие функции:

– функция потерь $f_{loss}(y, y')$, которая характеризует величину отклонения функции $y = f_{xy}(x)$ от правильных значений функции $y' = f'_{xy}(x')$, где $x' \in X$ и является произвольным значением;

– функционал качества:

$$Q(X, X^{train}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{loss}(y, y'), \quad (3)$$

характеризующий среднюю ошибку функционала на произвольной выборке X и на тестовой выборке X^{train} .

Наиболее успешной является такая зависимость $f_{xy}(x)$, которая имеет минимальную среднюю ошибку на тестовой выборке:

$$y = \operatorname{argmin}_{y \in Y} Q(X, X^{train}). \quad (4)$$

Отметим, что процесс построения алгоритма, с помощью которого будет производиться поиск наиболее оптимальных решений, является нетривиальным и трудно формализуемым. Как правило, подбор параметров алгоритма производится эмпирическим путем, с постоянной проверкой и оцениванием качества работы.

Так как рассматриваемое нами понятие «машинное обучение» используется в контексте обучения по прецедентам, или индуктивного обучения, которое основано на выявлении эмпирических закономерностей, а формулы (2) и (1) по сути идентичны, то данный подход можно отнести к классу физико-статистических подходов. Из анализа следует, что методы построения моделей машинного обучения схожи с методами построения физико-статистических моделей, тем самым представляется возможным рассмотреть их применимость при гидрометеорологическом обеспечении и прогнозировании метеорологических величин. Недостатком существующих физико-статистических моделей является необходимость проведения постоянного анализа всё возрастающих объемов разнородных данных с целью повышения точности прогнозов и уменьшения ошибки $\widehat{\Delta}_{(n)}$, а также невозможность автоматизировать этот процесс. С этой точки зрения модели машинного обучения легко поддаются автоматизации и быстро адаптируемы к новым типам и большим объемам данных, позволяющим повысить точность и оперативность прогнозирования метеорологических величин.

Технологии машинного обучения уже зарекомендовали себя в смежных областях, например в экономике [17], управлении [18], медицине [16]. Исследователями по всему миру ведется работа по поиску возможности их использования в процессах гидрометеорологического обеспечения. Необходимо отметить, что процесс моделирования ИНС сложен и трудно автоматизируем. Для моделирования необходимы знания в предметной области, знания в области математического анализа, статистики, теории вероятности и комбинаторики. Работы по автоматизации этого процесса ведутся, и уже есть первые результаты [12, 13]. Так, в компании Google разработан сервис AutoML, осуществляющий автоматический поиск наиболее удачных алгоритмов обучения. В настоящее время сервис обладает рядом ограничений, например невозможно выбрать несколько целевых показателей, ограничен набор инструментов машинного обучения. В то же время по отношению к некоторым алгоритмам, составленным группой исследователей и используемым на протяжении нескольких лет, с помощью AutoML были найдены более успешные алгоритмы обучения.

Так, например, зарубежными авторами Jinglin Zhang, Pu Liu, Feng Zhang была предложена модель ИНС, предназначенная для классификации облачности [4]. Авторами использовалась полносвязная многослойная нейронная сеть для классификации форм облачности по снимкам с земли. Результаты работы модели могут быть использованы для реализации полностью автоматизированного наблюдения за облачностью.

На рис. 3 представлены результаты обучения ИНС на наборе из 2542 изображений облачности.

Коллективом авторов Yumeng Tao и Kuolin Hsu с использованием технологий машинного обучения проведено восстановление осадков по данным дистанционного зондирования Земли. В качестве исходных использовались данные спутника GOES в инфракрасном диапазоне (10,8 мкм) и в диапазоне водяного пара (6,7 мкм), комбинация именно этих диапазонов оказалась наиболее подходящей для идентификации и оценки количества осадков. На рис. 4 представлены результаты работы модели PERSIANN-CCS и модели, предложенной авторами

для теплого и холодного периода. Рекомендуемый алгоритм машинного обучения на 44% превосходит используемую ранее модель PERSIANN-CCS.

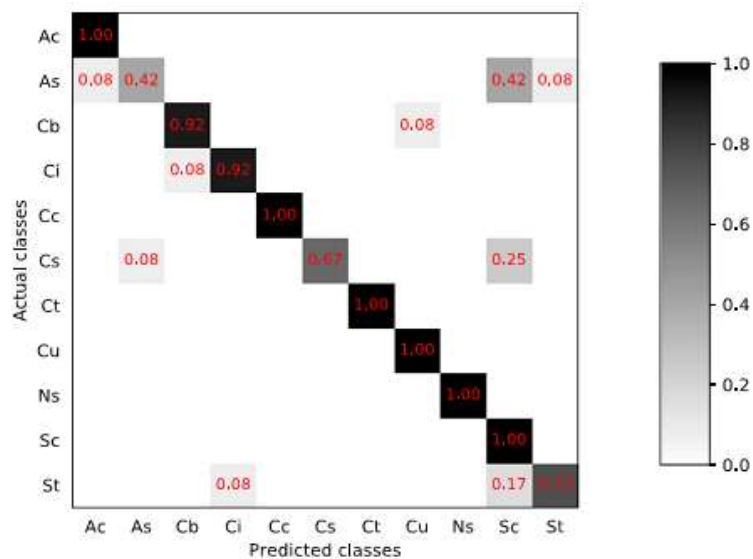


Рис. 3. Таблица соотношения процента классифицируемых форм облачности с наблюдаемыми

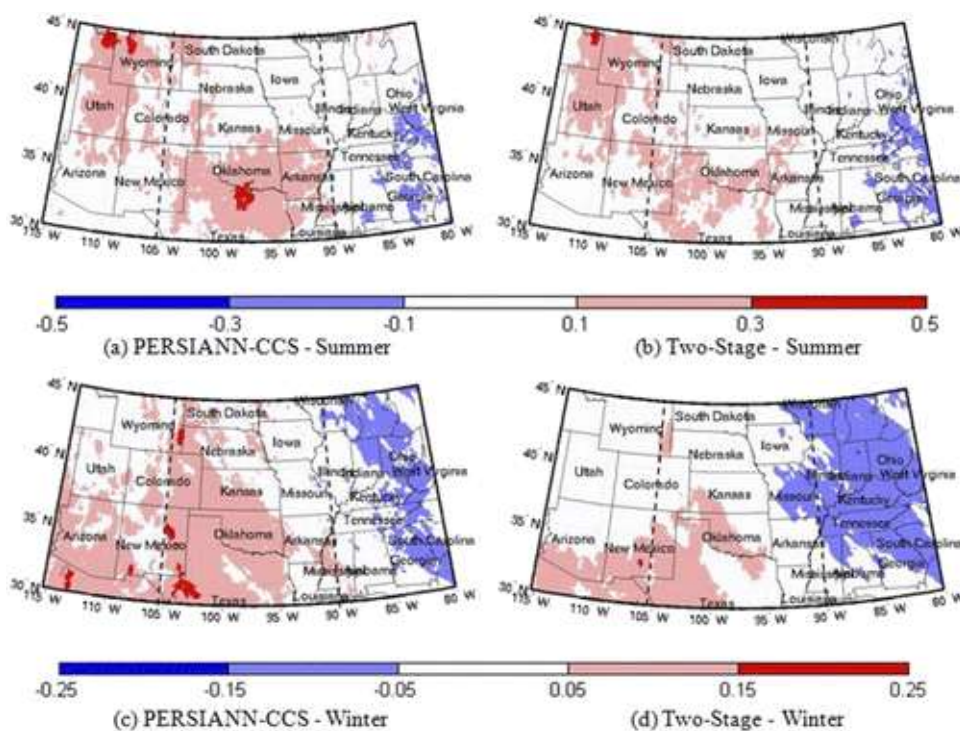


Рис. 4. Результаты работы моделей по прогнозированию количества осадков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Базируясь на проведенном анализе, можно сделать вывод о применимости методов машинного обучения при решении задач гидрометеорологического обеспечения. Зарубежный и отечественный опыт показывает, что использование этих технологий и методов позволяет решить задачи более эффективно, а также позволяет найти решение таких задач, алгоритми-

зация и автоматизация которых оказывается практически невозможной. При использовании больших объемов разнородных данных, таких как спутниковые изображения, фотографии облачности с земли, данные радарных наблюдений, традиционные методы расчета четко детерминированных моделей перестают действовать.

Список используемых источников

1. This Gartner Hype Cycle highlights how AI is reaching organizations in many different ways. – URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-on-the-gartner-hype-cycle-for-artificial-intelligence-2019/> (дата обращения: 15.03.2020).
2. *Суворов С.С.* Теоретические основы синтеза специализированных методов прогнозирования и диагностики геофизических условий в средней атмосфере: дис... д-ра. физ.-мат. наук: 20.02.09 / Станислав Станиславович Суворов. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1997. – 275 с.
3. *Tao Y., Hsu K.* A Two-Stage Deep Neural Network Framework for Precipitation Estimation from Bispectral Satellite Information. – URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JHM-D-17-0077.1> (дата обращения: 15.03.2020).
4. CloudNet: Ground-Based Cloud Classification With Deep Convolutional Neural Network / J. Zhang, L. Pu, F. Zhang, Q. Song. – URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL077787> (дата обращения: 15.03.2020).
5. *Gemma J., Donald D.* Machine Learning Predictions of a Multiresolution Climate Model Ensemble. – URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL077049> (дата обращения: 15.03.2020).
6. *Kalchbrenner N., Sønderby C.* A Neural Weather Model for Eight-Hour Precipitation Forecasting. – URL: <https://ai.googleblog.com/2020/03/a-neural-weather-model-for-eight-hour.html> (дата обращения: 15.03.2020).
7. *Кондратьева Т.Н.* Прогнозирование тенденции финансовых временных рядов с помощью нейронной сети lstm // Вестник евразийской науки. – 2017. – №4 (41). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-tendentsii-finansovyh-vremennyh-ryadov-s-pomoschyu-neyronnoy-seti-lstm> (дата обращения: 15.03.2020).
8. *Линдигрин А.Н.* Искусственные нейронные сети как основа глубинного обучения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – №12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennye-neyronnye-seti-kak-osnova-glubinnogo-obucheniya> (дата обращения: 15.03.2020).
9. Electroencephalogram-based emotion recognition using a convolutional neural network / V.B. Savinov, S.A. Botman, V.V. Sapunov et al. // Bulletin of Russian State Medical University. – 2019. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/electroencephalogram-based-emotion-recognition-using-a-convolutional-neural-network> (дата обращения: 15.03.2020).
10. Testing multilayer perceptron (mlp) for spatial interpolation / V. Nevtipilova, J. Pastwa, M.S. Boori, V. Vozenilek // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/testing-multilayer-perceptron-mlp-for-spatial-interpolation> (дата обращения: 15.03.2020).
11. *Готюр И.А., Костромитинов А.В.* Технология описания и раскодирования метеорологических данных на основе алгебраического подхода // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-opisaniya-i-raskodirovaniya-meteorologicheskikh-dannyh-na-osnove-algebraicheskogo-podhoda> (дата обращения: 15.03.2020).
12. Auto-WEKA 2.0: Automatic model selection and hyperparameter optimization in WEKA / K. Lars, T. Chris, H. Holger, H. Frank, L. Kevin. – URL: <http://jmlr.org/papers/volume18/16-261/16-261.pdf> (дата обращения: 15.03.2020).
13. Efficient and Robust Automated Machine Learning / F. Matthias, K. Aaron, E. Katharina, et al. – URL: <https://papers.nips.cc/paper/5872-efficient-and-robust-automated-machine-learning.pdf> (дата обращения: 15.03.2020).

14. *Васильев П.П.* Среднесрочный прогноз температуры воздуха и осадков по территории Евразии // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 2. – С. 13–23.
15. *Лбов Г.С.* Выбор эффективности системы зависимых признаков // Сб. трудов Института математики СО АН СССР. – 1965. – Вып. 19. – С. 21–33.
16. Применение нейросети для оценки моторных нарушений при болезни Паркинсона с использованием технологии видеозахвата в виртуальной реальности / Е.М. Каменских, И.В. Толмачев и др. // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2018. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyroseti-dlya-otsenki-motornyh-narusheniy-pri-bolezni-parkinsona-s-ispolzovaniem-tehnologii-videozakhvata-v-virtualnoy> (дата обращения: 07.03.2020).
17. *Майорский А.А.* Машинное обучение в биржевой торговле // E-Scio. – 2019. – №10 (37). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-obuchenie-v-birzhevoy-torgovle> (дата обращения: 07.03.2020).
18. *Шмид А.В., Лычагин К.А.* Машинное обучение в экспертных системах: подготовка специалистов // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – №2 (5). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-obuchenie-v-ekspertnyh-sistemah-podgotovka-spetsialistov> (дата обращения: 07.03.2020).

Д.А. Денисенков*,
кандидат физико-математических наук;
В.Ю. Жуков*,
доктор физико-математических наук;
Г.Г. Щукин*,
доктор физико-математических наук, профессор
*ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Анализируются возможности современного метеорологического радиолокатора обнаруживать зоны вертикального движения гидрометеоров, связанные с микропорывом или восходящими потоками воздуха внутри мощных кучево-дождевых облаков. Рассматриваются особенности применения для указанных целей оценок средней радиальной скорости частиц, модуля коэффициента корреляции горизонтально и вертикально поляризованных составляющих сигнала, ширины спектра принимаемых отражений. Делается вывод о перспективности использования последнего из перечисленных параметров.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, вертикальные потоки воздуха, распознавание опасных явлений погоды.

ВВЕДЕНИЕ

Задача своевременного обнаружения вертикальных потоков воздуха актуальна при решении многих практических задач. Прежде всего, это обеспечение полетов авиации, где данные потоки представляют большую опасность для воздушных судов при их нахождении на высотах от 0 до 500 м [1]. Потоки могут быть восходящие и нисходящие. Наиболее опасны последние, получившие название «микропорыв» (*microburst*). Они возникают в мощных кучево-дождевых облаках в виде быстрого снижения небольшого объема холодного воздуха, зарождающегося в верхней части облака и доходящего до земли. Встреча с ними воздушного судна при совершении посадки приводит к тому, что касание земли происходит до начала посадочной полосы. Восходящие потоки опасны тем, что вызывают «болтанку» самолета и также изменяют положение точки приземления в зависимости от того, насколько активно и профессионально пилот управляет в этот момент судном.

Распознавание и определение координат восходящих потоков в градоопасном облаке важно при проведении активных воздействий, когда требуется точно определить место введения реагентов, в котором достигается наибольший эффект.

То, что во всех перечисленных случаях горизонтальный размер неоднородности не превышает 4 км [2], делает практически невозможным привлечение для их распознавания средства космического базирования. Среди наземной техники, ввиду отсутствия у рассматриваемых опасных явлений каких-либо особенностей собственного излучения, для решения поставленной задачи применимы только приборы, излучающие в пространство энергию — содары, лидары и радары [3]. Далее рассматриваются только радиолокационные методы, как единственно применимые для микропорывов и грозовых облаков.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методы, основанные на оценивании среднего доплеровского сдвига принимаемого сигнала. Когерентный радиолокатор способен определять только радиальную скорость

увлекаемых воздухом частиц, т. е. проекцию вектора полной их скорости на ось радиолокатор – цель [4]. Следовательно, непосредственное наблюдение вертикального потока возможно только тогда, когда антенна расположена под достаточно большим углом места, а вертикальная скорость частиц достаточно велика, чтобы спектр создаваемых ими отражений мог быть выделен на фоне спектра сигнала от частиц, движущихся горизонтально и не вовлеченных в вертикальное движение. Поскольку для обеспечения авиации важны высоты до 500 м, то, полагая минимально практически применимым угол подъема антенны равным 10 град., получим, что в лучшем случае дальность обнаружения вертикального потока составляет чуть больше 2,5 км. На самом деле, она будет еще меньше и явно не удовлетворит требованиям обеспечения безопасности полетов. Решение задачи путем установки большого количества радиолокаторов приведет к большим финансовым затратам и техническим трудностям.

В случае наблюдения восходящих потоков в грозовых облаках условия не такие жесткие – высоты, на которых можно вести наблюдения увеличиваются до значений 5–15 км, что означает расширение радиуса обзора до 28–54 км.

Случай, когда облако оказалось на достаточно малой дальности для непосредственного распознавания восходящего потока представлен на рис. 1. На нем виден горизонтальный разрез пространственного распределения упомянутого параметра с указателем в виде черного отрезка прямой зоны, по которой сделан вертикальный разрез. На последнем поток выделяется в виде столба уменьшенных значений относительно средней радиальной скорости в соседних с ним участках.

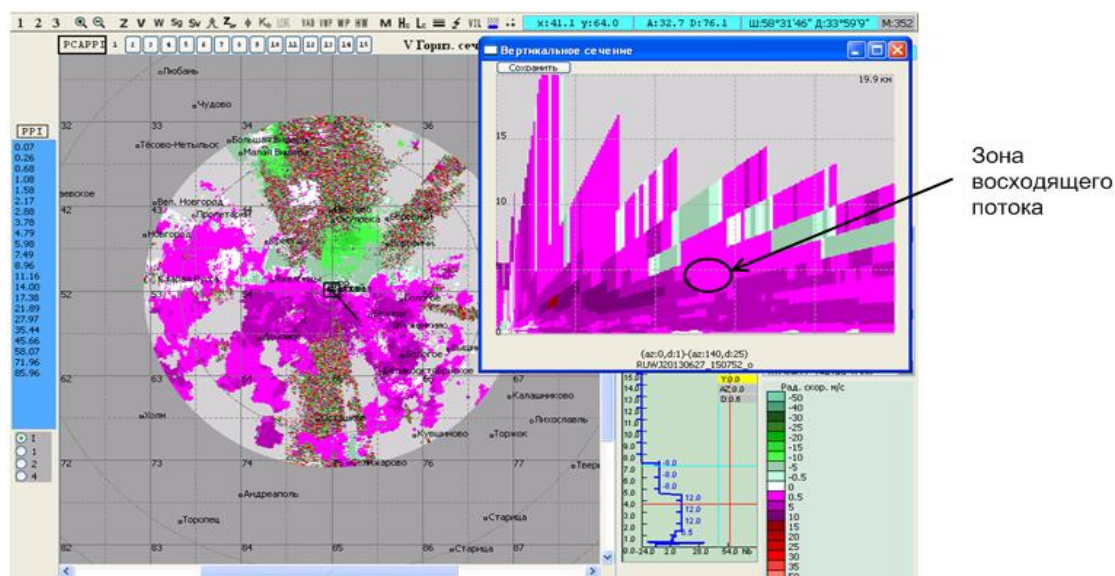


Рис. 1. Карта радиальных скоростей частиц. Горизонтальный разрез на высоте 1 км и вертикальный разрез с непосредственно наблюдаемым восходящим потоком

Однако достигаемый диапазон дальностей оказывается крайне малым по сравнению с инструментальной дальностью работы современных радиолокаторов, равной 250 км. Все это заставляет применять оценки среднего доплеровского сдвига частоты для обнаружения косвенных признаков присутствия вертикальных потоков [5]. Такими признаками являются неоднородности векторного поля скоростей в виде конвергенции в зоне его формирования и дивергенции при разрушении [6]. Примером такого устройства является американский радиолокатор обзора метеобстановки в районе аэропорта TDWR (англ. *Terminal Doppler Weather Radar*), предназначенный для распознавания микропорывов в районе взлетно-посадочной полосы [7]. Случай наблюдения косвенных признаков восходящего потока отечественным радиолокатором ДМРЛ-С приведен на рис. 2.

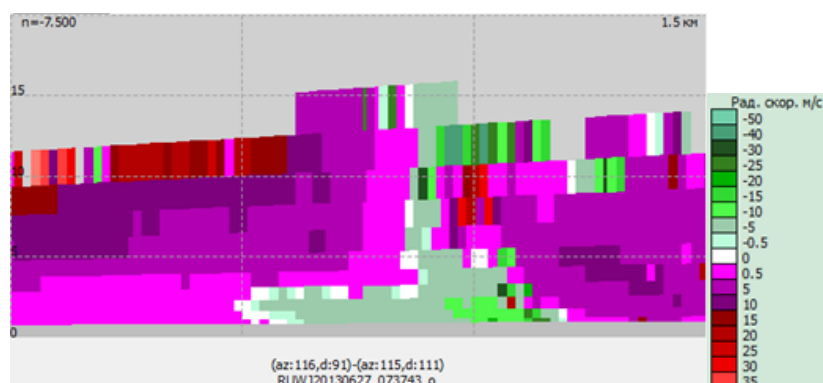


Рис. 2. Пример наблюдения вертикального воздушного потока.
Вертикальный разрез области потока с шагом сетки 5 км

Здесь хорошо просматривается существование, сначала в нижнем слое на дальности 10 км от начала разреза, а на больших расстояниях и до высоты 10 км, зоны с направлением ветра, противоположным общему движению воздуха, что объясняется «всасыванием» воздуха в вертикальное движение. Наблюдать сам поток на расстоянии 100 км невозможно, но его положение четко определяется как зона между отрицательными слева и повышенными положительными значениями скоростей справа от него (на высоте примерно 7 км).

Метод, основанный на оценках поляризационных параметров. Метод применим только к случаю наблюдения мощных кучево-дождевых облаков и основан на свойстве одного из поляризационных параметров, а именно модуля коэффициента взаимной корреляции горизонтальной и вертикальной составляющих принимаемых отражений, реагировать на попадание в луч антенны ледяных частиц, покрытых слоем воды. Однородным гидрометеорам, полностью жидким или полностью твердым, соответствуют его значения в пределах 0,98–1. При наблюдении же тающих градин оно падает ниже 0,98 [8]. В спокойном облаке это дает возможность четко определить положение нулевой изотермы, наблюдаемой в виде зоны таяния ледяных частиц (рис. 3)

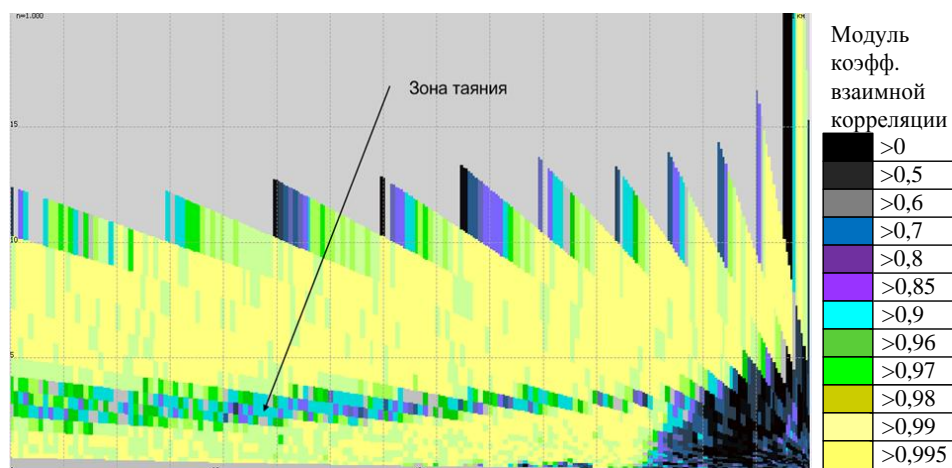


Рис. 3. Пример наблюдения зоны таяния на горизонтальном разрезе облака

Если же в облаке имеет место восходящий поток, в нем нет тающих частиц, вследствие чего рассматриваемый поляризационный параметр остается неизменным на всем пространстве его существования и в зоне таяния образуется «дырка». Это иллюстрируется рис. 4, на

котором изображена карта модуля взаимной корреляции того же объекта и в тот же момент времени, что и на рис. 1.

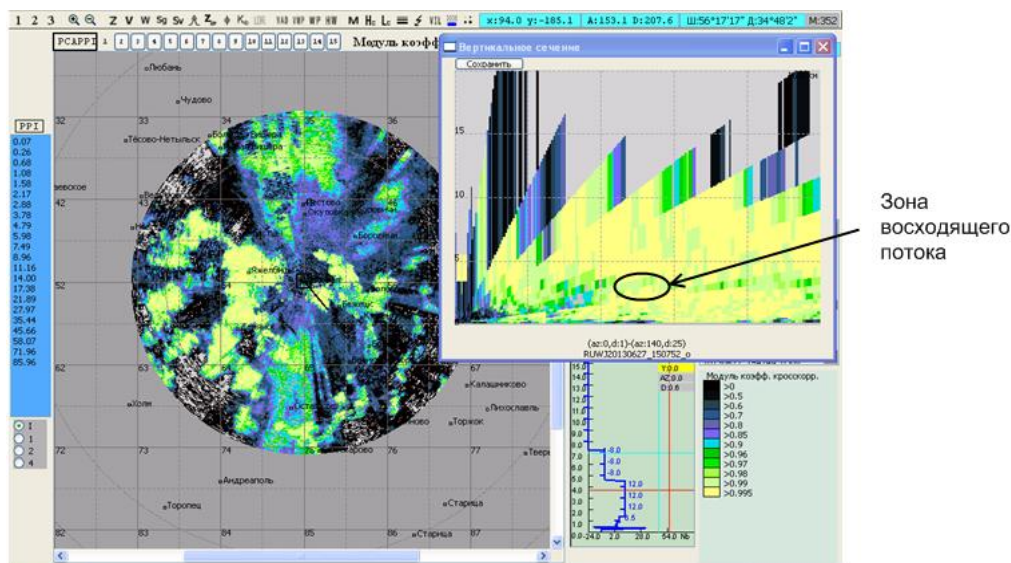


Рис. 4. Карта модуля коэффициента взаимной корреляции, соответствующая карте на рис. 1

Метод, основанный на оценках ширины спектра сигнала. Данный метод разработан в ВКА имени А.Ф. Можайского [9] и основан на том, что при наблюдении неоднородностей векторного поля скоростей ветра, один из линейных размеров которых, как правило, значительно меньше соответствующего размера элемента разрешения радиолокатора, спектр входного сигнала становится состоящим из двух составляющих, т. е. становится двухмодальным (имеющим два максимума). В результате ширина этого спектра, определяемая как среднеквадратическое отклонение значений его частот от среднего значения, становится аномально большой, т. е. такой, какой она не может быть при самом широком одномодальном спектре, – равномерной. Метод опробован для распознавания вертикальных сдвигов ветра и дал хорошие результаты [10, 11] (рис. 5).

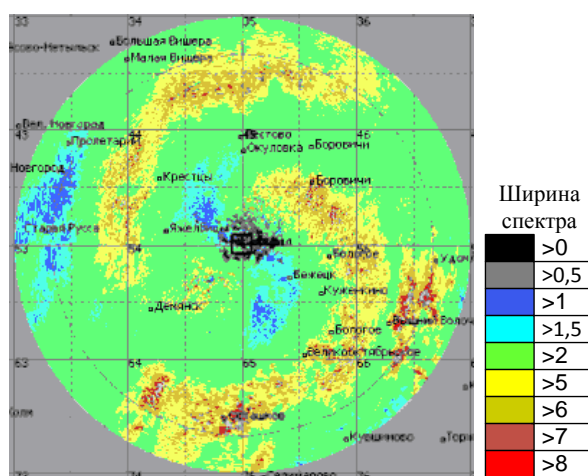


Рис. 5. Пример наблюдения вертикального сдвига ветра на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц. Конический разрез при значении угла места антенны 0,8 град.

Наблюдение вертикального потока фактически не отличается от наблюдения вертикального сдвига, основное отличие заключается в том, что вместо горизонтальных разрезов наблюдаемых объектов надо использовать вертикальные. Кроме того, как уже говорилось выше, расстояние между частотами, соответствующими максимумам спектра, может быть слишком мало и может не превышать интервал разрешения, т. е. сумму ширин спектра каждой из составляющей. В этом случае на помощь приходит амплитудное детектирование сигнала, которое, как было установлено [12], делает аппаратуру более чувствительной к упомянутой разнице частот. Следует добавить, что кроме отличия частот расположения максимумов спектры составляющих сигнала различаются по ширине. Та его часть, что формируется частицами, попавшими в поток, должна быть шире, чем та, которая соответствует частицам, движущимся только горизонтально, хотя бы в силу большей величины вектора результирующей скорости. Как показывают последние исследования, данное различие также приводит к расширению спектра сигнала, прошедшего амплитудное детектирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный метеорологический радиолокатор обладает большим арсеналом средств для своевременного распознавания такого опасного явления погоды, как вертикальные потоки воздуха. Наиболее распространен на практике метод, основанный на оценках средней радиальной скорости гидрометеоров. Однако то, что он, также как и метод, использующий поляризационные параметры сигнала, основан на наблюдении косвенных признаков явления, снижает его надежность. Поэтому актуальна задача поиска возможности непосредственного наблюдения потока, которую предоставляет новый метод, основанный на оценках ширины спектра принимаемых отражений.

Список используемых источников

1. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Моделирование выходных данных метеорологического радиолокатора при наблюдении неоднородностей поля ветра // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2019. – № 670. – С. 111–115.
2. Fujita T.T., McCarthy J. 1990: The application of weather radar to aviation meteorology / Radar in meteorology // D. Atlas (Ed.). – Boston: American Meteorological Society, 1990. – P. 657–681. – Doi: 10.1007/978-1-935704-15-7_43.
3. Стерлядкин В.В., Горелик А.Г., Щукин Г.Г. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: III Всероссийские Армандовские чтения: молодежная школа. – Муром: ВлГМУ, 2013. – С. 24–42.
4. 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.
5. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Современные проблемы метеорологической радиолокации // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 10. – С. 927–939.
6. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере / Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин // Известия вузов. Физика. – 2016. – № 12/2. – С. 15–19.
7. Chan, P.W., Pengfei Zhang 2012: Aviation Applications of Doppler Radars in the Alerting of Windshear and Turbulence. Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications // Dr. Joan Bech (Ed.). – London: IntechOpen, 2012. – P. 75–94. – Doi: 10.5772/38955.

8. *Ryzhkov A.V., Zrnica D.S.* Depolarization in ice crystals and its effect on radar polarimetric measurements // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – Vol. 24, № 7. – P. 1256–1267.
9. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Распознавание сдвига ветра по данным метеорологического радиолокатора // *Метеорология и гидрология*. – 2019. – №11. – С. 109–118.
10. 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. – №653. – С. 159–163.
11. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* О возможности измерения сдвига ветра по направлению в доплеровском метеорологическом радиолокаторе // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2018. – № 662. – С. 124–128.
12. *Бычков А.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Дополнительные информативные возможности малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» // *V Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: материалы V Всероссийской научной конференции*. – Муром: ВлГМУ, 2015. – С. 115–119.

К.А. Диденко*· **;

А.И. Погорельцев*· **,

доктор физико-математических наук, профессор

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ МОДЕЛИ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Показан метод исследования взаимодействий стационарных планетарных волн между собой и со средним потоком, основанный на анализе вклада слагаемых в уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии (квадрат потенциального вихря Эртеля). Используя данные модели средней и верхней атмосферы (МСВА), эти слагаемые были рассчитаны для зимы, когда наблюдалось/моделировалось сильное внезапное стратосферное потепление (ВСП). Результаты представлены в виде широтно-высотных распределений и показано усиление нелинейных взаимодействий в верхней стратосфере, как до наступления потепления, так и во время его развития.

Ключевые слова: стационарная планетарная волна, средний поток, энтропия, завихренность, внезапное стратосферное потепление.

ВВЕДЕНИЕ

С помощью уравнения возмущенной потенциальной энтропии можно проанализировать влияние волн на зональную циркуляцию, а также взаимодействие волн между собой. Уравнение баланса в log-изобарической системе координат в общем виде, с использованием потенциального вихря Эртеля P [1], будет иметь следующий вид:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} (\overline{P'^2}/2)}_A + \underbrace{P' (\overline{\vec{V}' \cdot \vec{\nabla} P'})}_B + \underbrace{P' (\overline{\vec{V}' \cdot \vec{\nabla} \bar{P}})}_C + \underbrace{P' (\overline{\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} P'})}_D = \underbrace{\overline{P' Q'}}_E, \quad (1)$$

где \vec{V} – вектор скорости ветра;

Q – вклад неадиабатических притоков тепла и/или диссипативных слагаемых, которые не могут быть оценены из наблюдений.

Черта сверху в уравнении (1) означает зональное осреднение, а штрихи – возмущения, т.е. отклонения от зонально усредненных значений. Слагаемое A описывает меру изменчивости волновой активности во времени, B – взаимодействие стационарных планетарных волн (СПВ) между собой, C – взаимодействие СПВ со средним потоком, D – адвективный перенос потенциальной энтропии, E – диссипация, которая не может быть оценена из наблюдений [2–3].

Используя метод генерации вторичных волн [4–5], уравнение, аналогичное (1), можно получить для стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2). В этом случае вторичные СПВ1 генерируются в результате нелинейных взаимодействий СПВ1 – СПВ2 и СПВ2 – СПВ3, а вторичные СПВ2 при взаимодействии СПВ1 – СПВ3 и в случае самовзаимодействия СПВ1.

ШИРОТНО-ВЫСОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, ПОСТРОЕННЫЕ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Так как во время внезапных стратосферных потеплений волновая активность усиливается, для расчетов слагаемых уравнения (1) использовались данные МСВА, когда моделировалось ВСП в январе [был получен ансамбль решений для условий Эль-Ниньо и выбран один из членов ансамбля] (рис. 1).

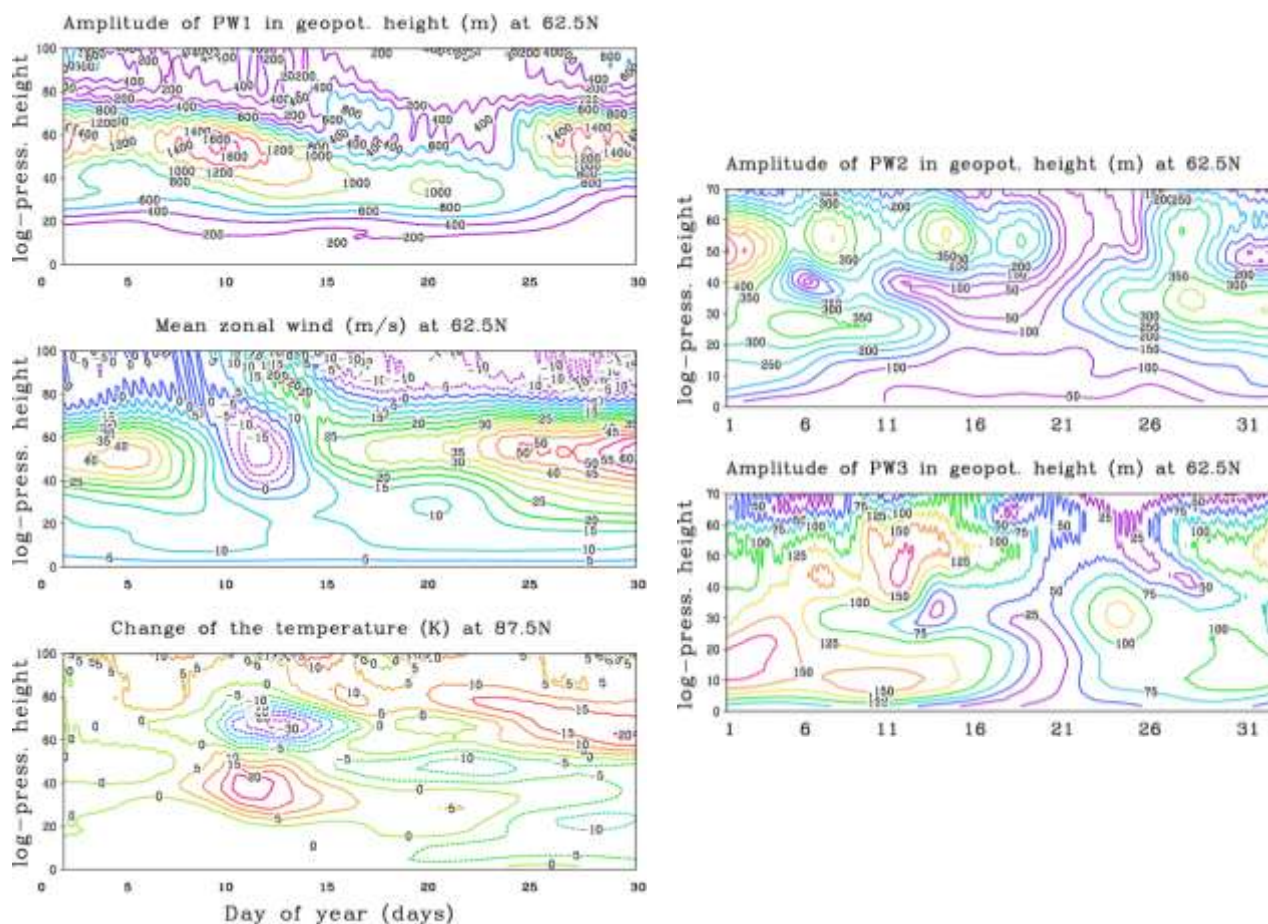


Рис. 1. Высотно-временное представление амплитуд зональных гармоник в геопотенциальной высоте (м) с волновым числом $m = 1$ (верхняя панель, слева), $m = 2$ (верхняя панель, справа) и $m = 3$ (нижняя панель, справа), распределение среднего зонального ветра (м/с) (средняя панель, слева) на $62,5^\circ$ с.ш. и изменения средней зональной температуры (K) на $87,5^\circ$ с.ш. (нижняя панель, слева)

Сильное увеличение амплитуд СПВ1 происходит 10 января, что сопровождается изменением среднего зонального потока в стратосфере. В результате несколько дней спустя наблюдается сильное внезапное стратосферное потепление. На рис. 1 также показано, что наступлению ВСП предшествует увеличение амплитуд не только СПВ1, но значительное увеличение амплитуд СПВ2 и СПВ3.

По данным МСВА слагаемые уравнения (1) были рассчитаны и усреднены за 5 дней, т.е. 1–5 января – дни до внезапного стратосферного потепления, происходит увеличение амплитуды СПВ1 (рис. 2 и 3); 6–10 января – амплитуда СПВ1 достигает максимального значения, увеличивается амплитуда СПВ2, начинается ВСП (рис. 4 и 5). Все результаты в единицах измерения $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сут.}$, где $1\text{PVU} = 10^{-6}\text{K}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$.

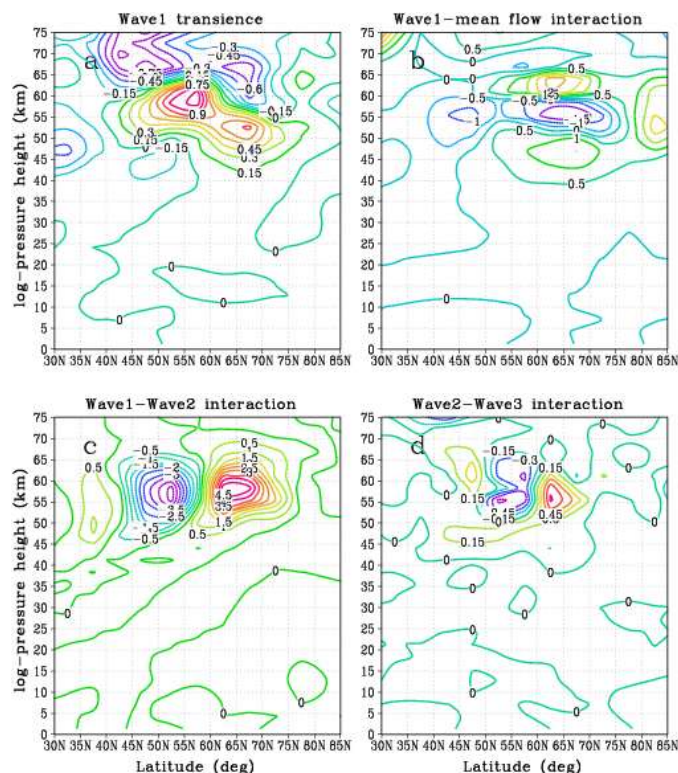


Рис. 2. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1, усредненные за 1–5 января:
 а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ1 – средний поток;
 с – взаимодействие СПВ1 – СПВ2; д – взаимодействие СПВ2 – СПВ3

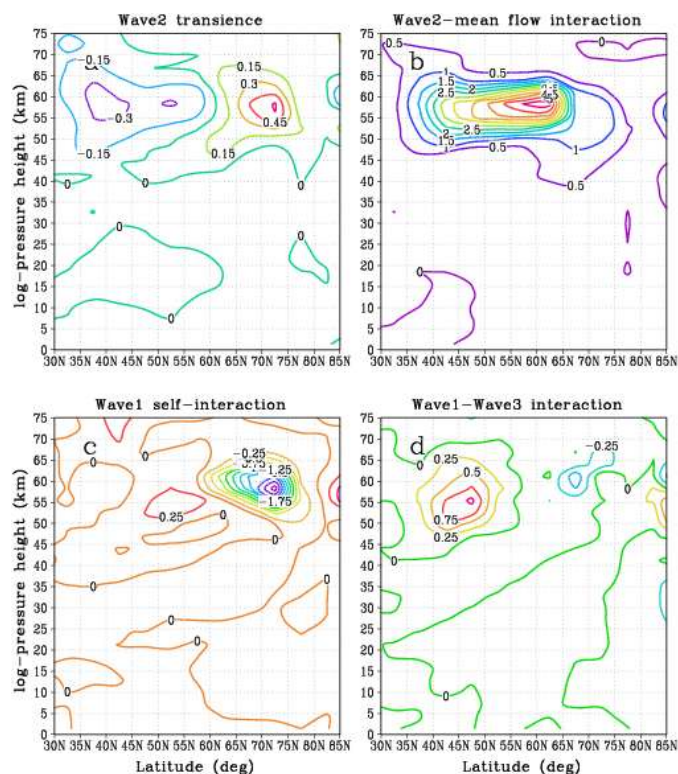


Рис. 3. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ2, усредненные за 1–5 января:
 а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ2 – средний поток;
 с – самовзаимодействие СПВ1; д – взаимодействие СПВ1 – СПВ3

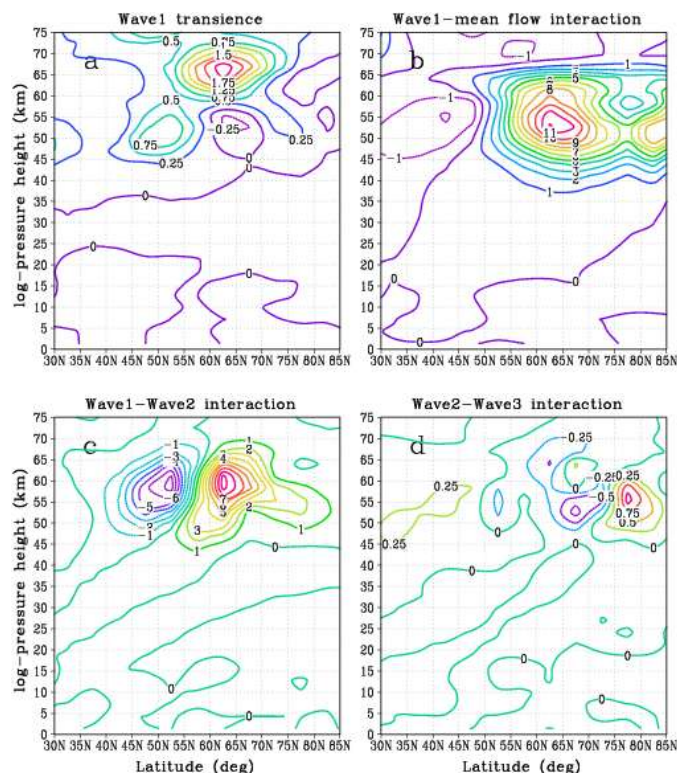


Рис. 4. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1, усредненные за 6–10 января:
 а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ1 – средний поток;
 с – взаимодействие СПВ1 – СПВ2; д – взаимодействие СПВ2 – СПВ3

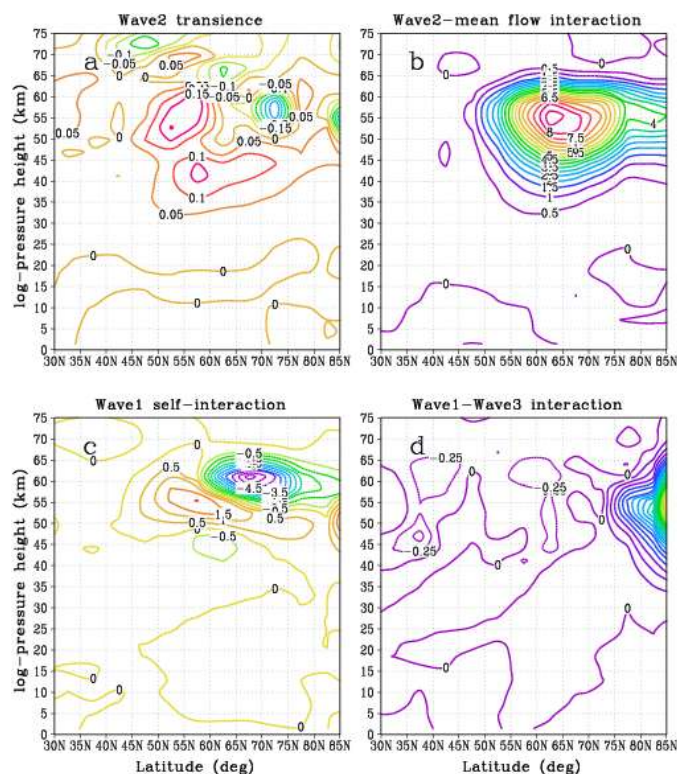


Рис. 5. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ2, усредненные за 6–10 января:
 а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ2 – средний поток;
 с – самовзаимодействие СПВ1; д – взаимодействие СПВ1 – СПВ3

Результаты расчета показывают, что внезапное стратосферное потепление сопровождается значительным усилением взаимодействий по типу «волна – волна» и «волна – средний поток» в верхней стратосфере в средних и высоких широтах, а в случае взаимодействия между волнами и в низких. В течение рассматриваемых промежутков времени увеличение волновой активности СПВ1 сопровождается уменьшением СПВ2 и наоборот (см. рис. 2,а–5,а). Особое внимание стоит уделить взаимодействию волны со средним потоком (см. рис. 2,б–5,б). До момента наступления ВСП наблюдается значительное усиление взаимодействия СПВ2 со средним потоком в более низких и средних широтах. К моменту начала развития потепления наиболее сильное взаимодействие наблюдается между СПВ1 и средним потоком. Взаимодействие по типу «волна – волна» также увеличивается на протяжении развития ВСП, достигая своих максимумов в последние дни потепления. Усиление волнового взаимодействия при генерации СПВ1 наблюдается в пределах всех средних и высоких широт, а в случае СПВ2 взаимодействие сдвинуто в более высокие широты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проанализированы нелинейные взаимодействия во время ВСП с использованием уравнения возмущенной потенциальной энтропии. Были показаны вклады слагаемых, отвечающих за изменение волновой активности во времени, взаимодействия по типу «волна – волна» и «волна – средний поток» в баланс. Событие ВСП характеризуется усилением всех типов взаимодействий в стратосфере. Стоит отметить, что результаты расчета показывают существенный вклад в генерацию вторичных волн СПВ3, особенно во время развития ВСП. Подобный подход можно применять в исследовании волновых процессов различных типов и периодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-17-00198.

Список используемых источников

1. *Andrews D.G.* On the interpretation of the Eliassen-Palm flux divergence // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* – 1987. – № 113. – P. 323–338.
2. *Smith A K.* Observation of wave-wave interactions in the stratosphere // *J. Atmos. Sci.* – 1983. – № 40. – P. 2484–2493.
3. *Smith A.K.* Wave-wave interaction in the stratosphere: observations during quiet and active wintertime period // *J. Atmos. Sci.* – 1984. – № 41. – P. 365.
4. *Spizzichino A.* Etude des interactions entre les differentes composantes du vent dans la haute atmosphere // *Ann. Geophys.* – 1969. – Vol. 25, № 4. – P. 773–783.
5. *Pogoreltsev A.I.* Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes // *Phys. Chem. Earth (Part C)*. – 2001. – Vol. 26, №. 6. – P. 395–403.

А.Н. Ефременко*,

кандидат технических наук, доцент;

Н.О. Моисеева**,

кандидат технических наук;

В.С. Потемкин*;

В.В. Черный*,

кандидат технических наук, доцент

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

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

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОДЪЕМА УРОВНЯ ВОДЫ

В статье рассматривается содержание метода прогноза подъема уровня воды в приграничных и трансграничных регионах Российской Федерации. Прогноз подъема уровня воды производится с помощью метода соответствующих уровней и протестирован на данных гидрологических постов реки Уссури (притоке Амура), где в июле – сентябре 2013 года наблюдалось катастрофическое наводнение, вызванное длительными ливневыми дождями.

Для прогноза дождевых паводков предлагается упрощенный вариант методики, применяемый при расчете параметров паводков с малых водосборов и используемый при проектировании дорог и пропускных сооружений.

Ключевые слова: подъем уровня реки, дождевые паводки, метод прогноза, морфометрические характеристики бассейна, автоматизированный программно-технический комплекс

ВВЕДЕНИЕ

Статистика Всемирной метеорологической организации (ВМО) свидетельствует о возрастании ущерба, наносимого экономике и населению стран мира, от опасных гидрометеорологических процессов и явлений. Установлено, что порядка 90% самых тяжелых экономических и человеческих потерь приходится на такие явления, как половодье, паводки, ливневые осадки, град, засуха, сели, лавины и т. п. В то время как на самые катастрофические явления (цунами, землетрясения, извержения вулканов) приходится до 10% [1].

Согласно современным научно обоснованным прогнозам, в том числе приведенным в оценочных докладах Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008–2019), наблюдаемые тенденции с высокой степенью вероятности сохранятся и даже усугубятся.

Если в период 1990–2000 годов Росгидромет ежегодно фиксировал по территории России порядка 150–200 опасных гидрометеорологических явлений и процессов, то в период 2000–2019 годов их число возросло до 200–250 (рис. 1) [2].

Например, в июне и июле 2019 года в восьми районах Иркутской области в результате паводка подтопило 110 населенных пунктов и 11 тысяч домов, было госпитализировано 191 человек. В наибольшей степени пострадали города Нижнеудинск и Тулун. Общее число пострадавших составило 45 тысяч человек, а экономический ущерб превысил 35 миллиардов рублей.

Важнейшие задачи анализа и прогноза гидрологических явлений на водных объектах суши могут быть решены в рамках разработки автоматизированного программно-технического комплекса (АПТК) гидрометеорологического обеспечения войск.

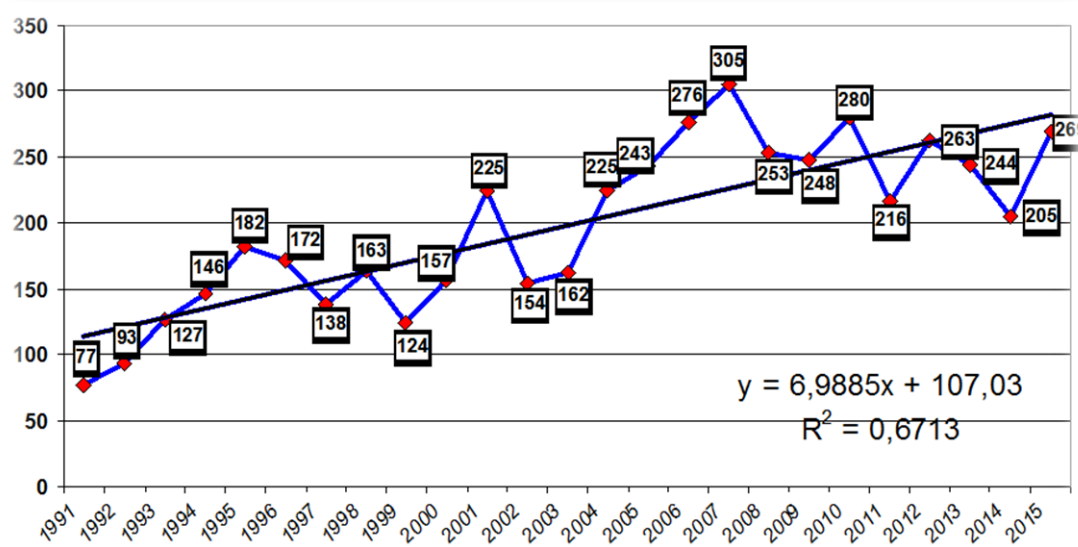


Рис. 1. Распределение числа опасных гидрометеорологических явлений и процессов в России (по оси ординат y) по годам наблюдений (ось абсцисс x). Здесь R^2 – квадрат множественного коэффициента корреляции [2]

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Для разработки методов прогноза гидрологических явлений был выбран район реки Уссури (притока Амура), где летом 2013 года наблюдалось катастрофическое наводнение, вызванное дождевыми паводками [3].

В процессе моделирования была сформирована база данных (БД), включающая в себя морфометрические характеристики бассейна реки Уссури: высоту поста, уклон реки, площадь водосбора, тип рельефа, вид грунта русла, тип растительности на склонах и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ содержания методов краткосрочных прогнозов водного режима рек показал, что по учитываемым физическим условиям их можно разбить на три группы [4]:

- основанные на закономерностях процессов, происходящих в русловой сети;
- основанные на закономерностях процессов стокообразования, происходящих на водосборе реки;
- основанные на учете статистических связей между основными стокообразующими факторами.

Наиболее простым и широко применяемым методом первой группы является метод соответственных уровней [5]. Суть метода сводится к установлению эмпирических связей между соответственными уровнями (расходами) воды, наблюдавшимися в верхнем и нижнем створах:

$$H_{н,t+\tau} = f(H_{в,t}), \quad (1)$$

где $H_{н,t+\tau}$ – уровень реки в нижнем створе в момент $t + \tau$;

$H_{в,t}$ – уровень реки в верхнем створе в момент t ;

τ – время добегания на участке между верхним и нижним створами.

Фактический подъем уровня реки можно рассчитать, установив вид зависимости (1) по результатам данных архивных гидрологических измерений на верхнем и нижнем створах реки. Для реализации метода соответственных уровней в качестве верхнего уровня выбран гидропост Березняки, а в качестве нижнего уровня – гидропост г. Лесозаводск на реке Уссури. Анализ гидрографов стока для всего паводкоопасного периода (май – октябрь) позволил выделить соответственные уровни, представленные на рис. 2.



Рис. 2. Гидрографы стока для гидропостов реки Уссури – Березняки и Лесозаводск

По выделенным значениям соответственных уровней был построен график соответственных уровней, т. е. зависимость между уровнем реки на нижнем створе (Лесозаводск) и верхнем створе (Березняки). Осреднение времени добегания дало значение, равное примерно одним суткам. График соответственных уровней изображен на рис. 3.



Рис. 3. График соответственных уровней для гидропостов реки Уссури – Березняки (верхний пост) и Лесозаводск (нижний пост)

Оказалось, что значение коэффициента корреляции между предвычисленными с помощью графика соответственных уровней и фактическими значениями уровня на посту Лесозаводск равно 0,47, и, следовательно, связь между уровнями реки на верхнем и нижнем створах мож-

но оценить как умеренную [6]. При этом значение средней относительной ошибки прогноза уровня реки в г. Лесозаводске за весь анализируемый период (май – октябрь) оказалось равным 29%, что связано с регистрацией в рассматриваемый период двух паводков.

Статистическая зависимость в виде линейного уравнения регрессии вида

$$y = -0,019x + 224,6$$

дала значение множественного коэффициента корреляции, равное 0,03, что соответствует слабой корреляционной связи [6].

В целях повышения успешности прогноза подъема уровня реки на рассматриваемых гидропостах реки Уссури был использован аналитический метод, применяемый при проектировании дорог и пропускных сооружений, который позволяет учесть морфометрические характеристики бассейна водосбора и количество выпавших жидких осадков за анализируемый период (май – октябрь) [7].

Для определения подъема уровня реки используется формула связи между параметрами дождевого паводка вида

$$q = \phi(h - z)^m F^n K \delta \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (2)$$

где q – расчетный ливневой расход воды, м³/с;

ϕ – морфологический коэффициент, зависящий от уклона главного лога i_0 ;

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.

Результаты расчетов параметров дождевого паводка на гидрологических постах реки Уссури представлены в табл. 1, в которой использованы следующие обозначения:

h_0 – фактический подъем уровня реки;

ϕ – морфологический коэффициент, зависящий от уклона русла;

H_p – расчетное повышение уровня реки;

$\frac{\Delta H}{H}$ – относительная ошибка, %.

Качество разработанного метода прогноза оценивается по величине модуля относительной ошибки прогноза, так как разность $\Delta H = H_p - h_0$ равна разности между расчетным и фактическим подъемами уровня реки. Данные представлены для паводка, произошедшего 13 сентября 1980 года, амплитуда которого была максимальной практически на всех гидрологических постах реки Уссури.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров дождевого паводка на гидрологических постах реки Уссури

Гидропост	h_0 , м	i , ‰	F , км ²	ϕ	q , м ³ /с	H_p , м	$\frac{\Delta H}{H}$, %
Березняки	1,6	45	536	0,024	173,87	1,495	6,0
Верхняя Бревка	2,48	2,6	1720	0,016	367,52	2,27	8,4
Новомихайловка	2,32	1,5	5170	0,01	687,87	2,84	12,0
Кокшаровка	1,76	1,1	23400	0,006	745,0	1,91	9,3
Кировский	1,24	0,3	24400	0,003	772,51	1,26	15,1
Лесоводск	0,93	0,2	26200	0,002	696,46	1,20	18,0
Шереметьево	0,87	0,2	156000	0,002	616,47	1,17	21,5

Из анализа таблицы следует, что на горных участках реки относительная ошибка прогноза уровня реки (6–18%) значительно меньше ошибки прогноза по методу соответственных уровней. На равнинных участках ошибка прогноза возрастает до 20–25%, что связано с распластовыванием паводка и увеличением площади водосбора до 150000 км². Проведенные расчеты позволили подтвердить работоспособность используемой методики на репрезентативном статистическом материале и учесть основные физические закономерности проявления таких сложных гидрологических явлений? как подъем уровня воды, в том числе в результате дождевого паводка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлены результаты разработки метода прогноза повышения уровня рек как с использованием соответственных уровней, так и с привлечением аналитических зависимостей, связывающих морфометрические параметры бассейна водосбора и метеорологическую информацию о количестве выпавших на водосборе жидких осадков. Так как в качестве анализируемого региона выбран бассейн реки Амур, где периодически наблюдаются разрушительные наводнения после дождевых паводков, то для территории Восточного военного округа (ВВО) предлагается использовать метод аналитического описания прогноза уровня рек.

Выбор региона был вызван тем, что целый ряд притоков Амура имеет истоки на территории Китая, что не позволяет контролировать процессы выпадения осадков в указанном бассейне, а следовательно, заблаговременно предупреждать население и личный состав ВВО о возможных наводнениях с целью минимизации ущерба от них.

Список используемых источников

1. Воздействие опасных метеорологических явлений на экономику и население // Метеорология и экономика. – ВНИИГМИ-МЦД, 2015.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год / Росгидромет. – М., 2017. – 70 с.
3. Катастрофическое наводнение в Дальневосточном федеральном округе: научно-методический труд МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. – Т. 1: Уроки и выводы. – 154 с.
4. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 256 с.
5. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 182 с.
6. Шмойлова Р.А. Теория статистики. – М.: Финансы и статистика, 2012. – 656 с.
7. Руководство по гидрологическим прогнозам. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – Вып. 2: Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – 248 с.

Б.Г. Зайнетдинов^{*};

А.Г. Клово^{**},

кандидат физико-математических наук;

Т.В. Кудринская^{**},

кандидат физико-математических наук;

Г.В. Куповых^{*},

доктор физико-математических наук, профессор;

Д.В. Тимошенко^{**},

кандидат физико-математических наук

^{*}Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург.

^{**}Южный федеральный университет, г. Таганрог.

ФОРМИРОВАНИЕ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Построена математическая модель механизма генерации суточных вариаций электрического поля в турбулентном приземном слое вследствие изменений глобального электрического тока. Исследована зависимость сдвига фаз колебаний приземного электрического поля относительно вариаций полного тока в атмосфере от степени турбулентного перемешивания. Теоретические расчеты хорошо согласуются с данными наблюдений за электрическим полем на полярных станциях.

Ключевые слова: электрическое поле, ток, турбулентная диффузия, приземный слой.

ВВЕДЕНИЕ

Исходя из результатов многолетних наземных атмосферно-электрических наблюдений в различных пунктах и в разных метеорологических условиях установлено, что суточные вариации электрического поля имеют две компоненты: глобальную и локальную. В роли глобальной компоненты выступает унитарная вариация потенциала ионосферы, имеющая утренний минимум (03–05) *UT* и вечерний максимум (19–20) *UT*, которая хорошо проявляется при измерениях электрического поля над океанами [1]. Глобально-репрезентативными пунктами, расположенными на континентах, могут быть полярные или высокогорные области [2–5]. При отборе данных по условиям «хорошей погоды» и обработке рядов данных по большому количеству неполярных станций также получается кривая, хорошо согласующаяся с унитарной вариацией [6]. В местах, где отсутствуют сильные аэрозольное и радиоактивное загрязнения атмосферы, локальные возмущения определяются электрическими процессами в приземном слое, связанными с действием электродного эффекта вблизи поверхности Земли [7]. Выделение глобальных вариаций на фоне локальной изменчивости приземного электрического поля данных нуждается в точной информации о физических причинах возмущений. Статистические методы обработки экспериментальных данных требуют длительных рядов наблюдений и не дают прямых ответов о механизме формирования электрических структур в приземном слое. Поэтому необходимо развитие теоретических представлений о нестационарных электродинамических процессах в нижних слоях атмосферы и их взаимодействия с глобальной электрической цепью [8].

В работах [9, 10] была построена модель генерации суточных вариаций электрического поля вследствие изменений глобального электрического тока в турбулентном приземном слое. Выявлены сдвиг по времени минимума и максимума в суточном ходе электрического поля в приземном слое по сравнению с вариациями глобального тока, а также изменения амплитудных значений в зависимости от значений коэффициента турбулентного перемешива-

ния в атмосфере. Новые экспериментальные данные о вариациях электрического поля в полярных областях [5] говорят о необходимости дальнейшего развития теоретических исследований.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В соответствии с математической моделью, представленной в работе [5], рассмотрим задачу пространственно-временного распределения приземного электрического поля $E(z, t)$ в приближении турбулентного электродного эффекта вследствие вариации плотности электрического тока на верхней границе электродного слоя:

$$\frac{\partial E}{\partial t} - D_0 \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E = 4\pi j(t), \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$E|_{t=0} = E_1(z), \quad E|_{z=0} = E_0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=z_\infty} = 0. \quad (2)$$

Здесь D_0 – коэффициент турбулентной диффузии;

$E_1(z)$ – профиль электрического поля в начальный момент времени, $E_1(z) = E_0 e^{-\frac{z}{L}}$, где L – характерный масштаб высоты турбулентного электродного слоя, $L = 10$ м; E_0 – значение электрического поля на поверхности Земли.

Закон изменения плотности тока в течение суток зададим в виде

$$j(t) = j_0 (2 - \cos(\omega t + \varphi_0)). \quad (3)$$

Для решения задачи (1) и (2) можно воспользоваться методом Фурье [9]. После соответствующих математических преобразований получаем функциональную зависимость напряженности электрического поля от координаты и времени в виде ряда Фурье:

$$E(z, t) = E_0 + \sqrt{\frac{2}{z_\infty}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{(4\pi\lambda + D_0\mu_n)t}}{\omega^2 + (4\pi\lambda + D_0\mu_n)^2} \left(e^{(4\pi\lambda + D_0\mu_n)t} \left((4\pi\lambda + D_0\mu_n) \cos \omega t + \omega \sin \omega t \right) + (4\pi\lambda + D_0\mu_n) \right) \sin \frac{\pi(2n-1)z}{2z_\infty}. \quad (4)$$

Оценки остаточных членов ряда в соотношении (4), приведенные подробно в работе [8], позволяют при анализе поведения напряженности поля в приземном слое ограничиться вторым приближением полученного ряда.

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 приведены кривые суточного хода электрического поля в период октябрь – март на ГМО Тикси, станциях Диксон и м. Баранова [5] в сравнении с унитарной суточной вариацией, полученной во время экспедиции Карнеги, и наблюдениями на о. Мод (данные представлены в относительных единицах).

На рис. 2 приведены результаты теоретических расчетов временных изменений электрического поля на высоте 1 м с так называемой нулевой начальной фазой при различных значениях коэффициента турбулентной диффузии [10].

Анализ кривых на рис. 2 показывает эффект смещения амплитудного значения напряженности электрического поля на более позднее время с ростом коэффициента турбулентной диффузии, т.е. с увеличением скорости приземного ветра до 5-6 м/с.

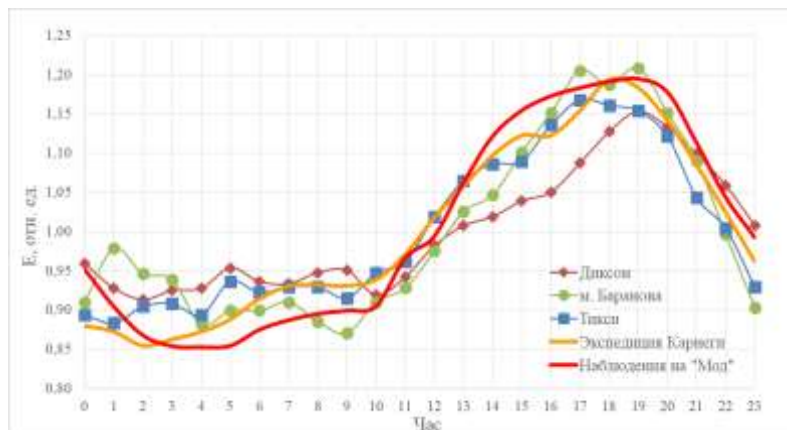


Рис. 1. Среднесуточные вариации электрического поля в различных пунктах

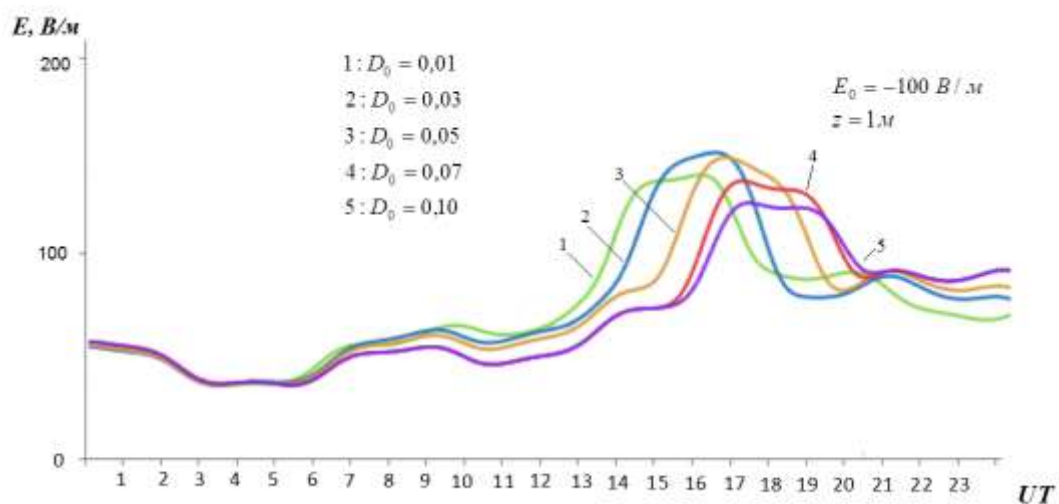


Рис. 2. Суточный ход напряженности электрического поля ($\phi_0=0$) при различных значениях коэффициента турбулентной диффузии



Рис. 3. Среднесуточные вариации электрического поля для различных значений скорости (V) ветра

На рис. 3 приведены суточные вариации напряженности электрического поля при разных диапазонах скорости ветра, но не превышающих требования условий «хорошей погоды» (0–6 м/с) на полярной станции Тикси по данным наблюдений за период 2014–2018 гг. При этом можно видеть аналогичный эффект смещения максимума и минимума в ходе электрического поля, но имеются расхождение на 2–3 ч с теоретическими кривыми.

Проведенные расчеты показали, что оптимальным с точки зрения соответствия получаемых графиков вариации напряженности электрического поля данным наблюдений является выбор в качестве начальной фазы вариации плотности тока значения $\varphi_0 = \pi/4$. В этом случае можно отметить практически полное совпадение модельных расчетов и экспериментальных кривых (рис. 4).

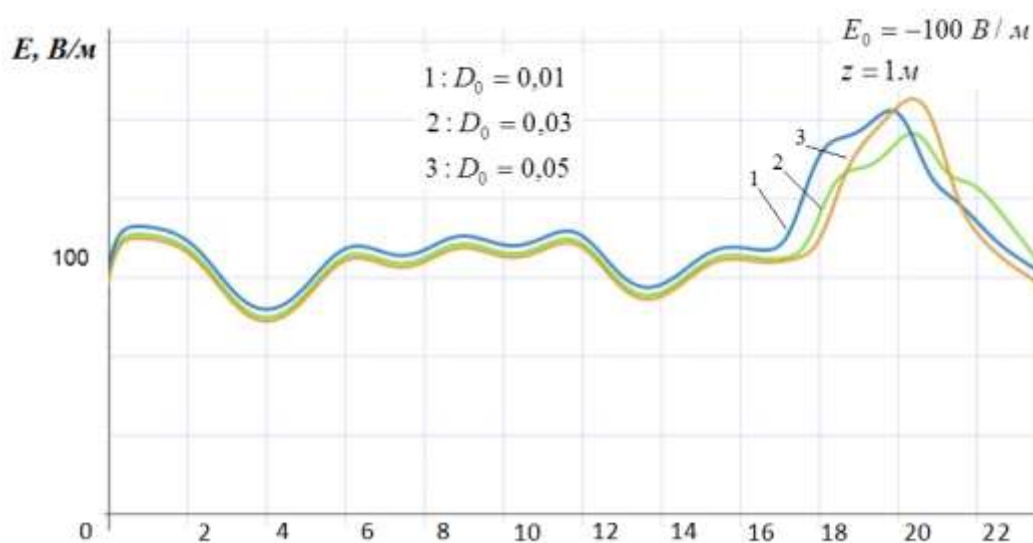


Рис. 4. Суточный ход напряженности электрического поля ($\varphi_0 = \pi/4$) при различных значениях коэффициента турбулентной диффузии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена математическая модель механизма генерации суточных вариаций электрического поля вследствие изменений глобального электрического тока в турбулентном приземном слое. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными на полярных станциях. Обнаружены появление сдвига по времени расположения минимума и максимума в суточном ходе электрического поля по сравнению с вариациями глобального тока и изменения амплитудных значений в зависимости от значений коэффициента турбулентного перемешивания в приземном слое. Уточнено модельное представление фазы колебаний глобального тока. Теоретические расчеты и данные наблюдений показали качественное и численное совпадение.

Список используемых источников

1. Mauchly S.J. Diurnal variation on the potential gradient of atmospheric // Terr. Magn. . Atm. El. – 1923. – Vol. 28. – P. 61–81.
2. Анализ результатов синхронных измерений E в Приэльбрусье и на Кольском полуострове: результаты исследований по международным геофизическим проектам / В.Н. Еро-

хин, А.С. Канаев, Г.В. Куповых и др. // Магнитосферные исследования. – 1990. – № 15. – С. 44–47.

3. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В.* Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений // ДАН. Геофизика. – 2015. – Т. 462, № 2. – С. 213–216.

4. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В.* Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51, №.6. – С. 710–715.

5. *Зайнетдинов Б.Г.* Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в Полярном регионе // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2018. – № 588. – С. 47–61.

6. *Огуряева Л.В., Шварц Я.М.* Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // Метеорология и гидрология. – 1987. – №7. – С. 59–64.

7. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.

8. *Морозов В.Н., Соколенко Л.Г., Зайнетдинов Б.Г.* Глобальная электрическая цепь в атмосфере: теоретические модели и экспериментальные данные // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2018. – № 589. – С. 98–113.

9. Моделирование глобальных вариаций электрического поля в приземной атмосфере / А.Г. Клово, Г.В. Куповых, С.С. Свидельский, Д.В. Тимошенко // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – №662. – С. 37–41.

10. *Kupovykh G., Klovo A., Timoshenko D.* The Atmospheric Electric Field Variations in The Surface Layer // Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). 1–6 July 2019. – Publisher: IEEE, 2019. – P. 580–583.

О.И. Золотухина,

кандидат географических наук

Филиал АО «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова», г. Москва.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОПАСНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ В РАЙОНЕ КОСМОДРОМА «ВОСТОЧНЫЙ»

В работе представлена временная и пространственная изменчивость грозовой активности на территории исследования. Проведен сравнительный анализ индексов неустойчивости атмосферы в дни «гроза с ливнем» и «ливень». Определены интервалы значений индексов неустойчивости атмосферы, при которых можно регистрировать состояние атмосферы «гроза с ливнем» или «ливень».

Полученные результаты могут быть использованы для разработки альтернативных методов прогноза опасных конвективных явлений в радиусе 200 км над территорией космодрома «Восточный», а также при подготовке и пуске ракет космического назначения (РКН).

Ключевые слова: космодром «Восточный», конвекция в атмосфере, «гроза с ливнем», «ливень», индексы неустойчивости атмосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Опасные явления погоды, такие как грозы и ливни, связанные с зонами активной конвекции, относятся к мезомасштабным метеорологическим явлениям. Они образуются в результате сложного взаимодействия атмосферных процессов синоптического масштаба и подстилающей поверхности. Горизонтальные размеры конвективных зон во много раз меньше, чем расстояния между метеорологическими станциями, на которых они наблюдаются, также невелика и продолжительность гроз и ливней. Все это определяет трудности в регистрации, изучении и прогнозировании явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции, в том числе в рамках численных моделей атмосферы [1].

Опасные явления погоды могут оказать существенное влияние на ход выполнения работ с ракетами космического назначения (РКН) в период их подготовки на техническом комплексе, транспортировки на стартовый комплекс, подготовки на стартовом комплексе и во время пуска. В связи с этим развитие конвекции и формирование опасных явлений погоды постоянно контролируют специалисты метеорологической службы космодрома для того, чтобы с максимальной заблаговременностью предупредить должностных лиц, которые руководят подготовкой и пуском РКН, для сведения к минимуму воздействия опасных явлений погоды на технические средства и специалистов, выполняющих работы. В связи с вышесказанным нетрудно сделать вывод, что изучение характеристик конвекции и опасных конвективных явлений погоды в районе строящегося космодрома является актуальным.

Информацией о степени развития конвекции послужило наличие опасных явлений погоды, таких как гроза и ливень. Данные о времени образования и локализации этих явлений за летний период (июнь – август) 1985–2018 годов были получены с сети метеорологических станций Амурской области (Шимановск, Свободный, Мазаново, Братолюбовка и Благовещенск), а также с метеостанций Китая (Хума и Хэйхэ) [2, 3]. Все метеорологические станции находятся в радиусе 200 км от космодрома «Восточный» и территориально отнесены к ближайшей аэрологической станции Амурской области – Благовещенск.

За те дни, когда на метеостанциях регистрировались опасные конвективные явления, изучались термодинамические характеристики атмосферы, полученные по данным аэрологического зондирования атмосферы со станции Благовещенск в сроки 00 и 12 ч всемирного скоординированного времени (BCB) [4].

ХАРАКТЕРИСТИКА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ В РАЙОНЕ КОСМОДРОМА «ВОСТОЧНЫЙ»

Для выявления особенностей грозовой активности в районе космодрома «Восточный» использовались данные с метеостанций Амурской области, в том числе с метеостанции Благовещенск как станции с высоким общим числом и средним числом дней с грозой.

Данные о числе гроз систематизировались за период 1985–2018 годов с июня по август за срок 00 и 12 ч ВСВ [2, 3]. За рассматриваемый период на метеостанции Благовещенск в среднем отмечалось 22 дня с грозой. Наиболее грозовым месяцем был июль, количество грозовых дней в среднем составило 8, в июне и августе в среднем отмечалось 8 и 7 дней с грозой соответственно. В среднем за срок 12 ч ВСВ было зарегистрировано 8 дней с грозой, за срок 00 ч ВСВ наблюдалось 2 дня с грозой.

При помощи автокорреляционной функции обнаружено, что статистически значимым с вероятностью 95% является цикл грозовой активности продолжительностью 7 лет. Однако этот результат можно считать предварительным, поскольку значимых циклов в рядах грозовой активности на станции Мазаново не обнаружено. Тем не менее циклы в рядах обеих станций могут иметь место, но для их обнаружения необходимы ряды более длительных наблюдений за грозами.

ИНДЕКСЫ, ОПИСЫВАЮЩИЕ КОНВЕКТИВНОЕ СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРЫ

Для характеристики степени развития конвекции были отобраны индексы, наиболее часто используемые в исследованиях такого рода [5–9].

В первую очередь это индексы, описывающие латентную нестабильность атмосферы: Lifted index (LIFT). Интенсивность развития конвективных вертикальных движений определяется, в основном, стратификацией температуры воздуха. Эту характеристику состояния атмосферы на уровне 500 гПа отражают значения индекса LIFT, которые отличаются по высоте уровня, откуда частица начала подъем [5, 7].

Степень развития вынужденной конвекции при влажнонеустойчивой стратификации атмосферы зависит от толщины влажнонеустойчиво стратифицированных слоев. Заметим, что наличие таких слоев является необходимым условием для развития опасных конвективных явлений. Поэтому вторую группу индексов представляют индексы, в которых кроме стратификации температуры присутствуют характеристики влажности: K index (KIND), Total Totals index (TOTL).

Третья группа индексов оценивает энергию конвективного потенциала атмосферы. Величина энергии неустойчивости является неизменным предиктором в прогнозе опасных явлений, связанных с конвекцией. Высокий уровень потенциальной энергии атмосферы является неременным условием того, что поднимающаяся частица достигнет значительно больших высот, чем уровень свободной конвекции. Эту характеристику состояния атмосферы достаточно эффективно отражает индекс CAPE [5, 7]. Значение индекса CAPE (Дж/кг) – потенциальная конвективная энергия атмосферы.

Level of Free Convection (LFCT) используется как самостоятельная (дополнительная) характеристика мощности конвективно неустойчивого слоя атмосферы. LFCT – это уровень свободной конвекции, является высотой в атмосфере, на которой насыщенный воздух становится теплее, чем окружающий воздух и поднимается свободно, что происходит наиболее легко в условно неустойчивой атмосфере.

Четвертая группа индексов оценивает совокупность температурно-влажностных и ветровых характеристик, наиболее популярным из них является индекс «суровости погоды» (SWEAT). Индекс SWEAT оценивает вероятность развития неблагоприятных явлений пого-

ды, объединяя несколько параметров в одном индексе: и толщину влажнонеустойчивого слоя, и неустойчивость как следствие стратификации температуры и скорость ветра на уровнях 850 и 500 гПа. Таким образом, это попытка объединить кинематическую и термодинамическую информацию в одном индексе.

СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРЫ В ДНИ С ОПАСНЫМИ КОНВЕКТИВНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

Для описания состояния атмосферы в дни с зарегистрированными опасными конвективными явлениями рассчитывались значения всех перечисленных выше индексов и их средние значения сравнивались с приведенными в литературе [10]. Пороговые значения неустойчивости (или характеризующих ее величин), начиная с которых появляется значительная вероятность развития той или иной формы конвекции, зависят от местных условий [10].

Состояние атмосферы исследовалось с июня по август 1985–2018 годов, по данным аэрологического зондирования на станции Благовещенск в сроки 00 и 12 ч ВСВ, в дни с наличием опасных конвективных явлений (ливней и гроз) на территории в радиусе 200 км от космодрома «Восточный» [4]. По данным аэрологической станции Благовещенск были рассчитаны и проанализированы статистические характеристики индексов за 12 ч ВСВ.

При наличии гроз территория, охваченная конвективной деятельностью, может быть различна, поэтому имеющаяся информация была разделена на две группы: дни, когда наблюдались «отдельные грозы» только на одной из станций, входящих в радиус наших исследований, и дни, когда грозы регистрировались на двух и более метеорологических станциях – «повсеместные грозы».

Сравнивая статистические характеристики термодинамических параметров «отдельные грозы» и «повсеместные грозы» (табл. 1), можно сделать вывод, что значения индексов имеют незначимые с вероятностью 95% различия по критерию Пирсона.

Таблица 1

**Статистические характеристики термодинамических параметров
для аэрологической станции Благовещенск при состояниях атмосферы «отдельные
грозы» и «повсеместные грозы» в 12 ч ВСВ**

Отдельные грозы					Повсеместные грозы			
Индекс	Среднее	σ	Макс.	Мин.	Среднее	σ	Макс.	Мин.
LIFT, °C	-1,5	2,5		-7,7	-1,7	2,4		-8,8
SWEAT	195	68	454		207	77	466	
KIND, °C	32	5	52		33	4	43	
TOTL, °C	49	9	47		49	4	59	
CAPE, Дж/кг	551	608	3502		620	682	3078	
LFCT, гПа	768	81	933	499	750	88	891	313

В дальнейшем неустойчивое состояние атмосферы делилось на две группы: «ливень» и «гроза с ливнем». В табл. 2 приведены статистические характеристики термодинамических значений для этих категорий состояния атмосферы.

Таблица 2

**Статистические характеристики термодинамических индексов
для аэрологической станции Благовещенск «ливень»
и «гроза с ливнем» за срок 12 ч ВСВ**

Индекс	Ливень				Гроза с ливнем			
	Среднее	σ	Макс.	Мин.	Среднее	σ	Макс.	Мин.
LIFT, °C	-0,3	2,5		-7,7	-1,6	2,4		-8,8
SWEAT	171	60	383		199	71	466	
KIND, °C	30	5	50		32	5	52	
TOTL, °C	47	4	56		49	4	59	
CAPE, Дж/кг	350	522	3528		577	642	3902	
LFCT, гПа	776	103	941		762	84	933	

Сравнивая значения индексов (табл. 2) «ливень» и «гроза с ливнем», можно сделать следующие выводы:

- средние значений индексов KIND и TOTL «ливень» и «гроза с ливнем», которые характеризуют не только термодинамическую неустойчивость, но и влажность в слое 700–850 гПа, существенно не отличаются;
- уровень свободной конвекции (LFCT) в грозовых облаках выше, чем в ливневых на 500 м;
- среднее значение индекса LIFT при состоянии «гроза с ливнем» больше значения состояния «ливень». По данным классификации (см. табл. 1) при таких значениях индекса возможно наличие ливней и отдельных гроз;
- комплексный параметр SWEAT «гроза с ливнем» примерно на 30 единиц превосходит тот же параметр «ливень», так как в грозовых облаках отмечаются большие скорости ветра и значительные сдвиги ветра;
- потенциальная конвективная энергия атмосферы (CAPE) «гроза с ливнем» составляет 572 Дж/кг, что в 1,5 раза больше значения индекса CAPE «ливень».

ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНДЕКСОВ В ДНИ «ЛИВЕНЬ» И «ГРОЗА С ЛИВНЕМ»

С уменьшением значений индекса LIFT неустойчивость атмосферы увеличивается. Кумулятивная кривая (рис. 1,а) дает наглядное представление, как меняется накопленная относительная частота ливней и гроз при изменении индекса LIFT. Анализируя распределение на рис. 1, можно утверждать, что около 75% всех ливней случается при значениях LIFT от -9 до 0 °C, а ливней с грозой – 85%.

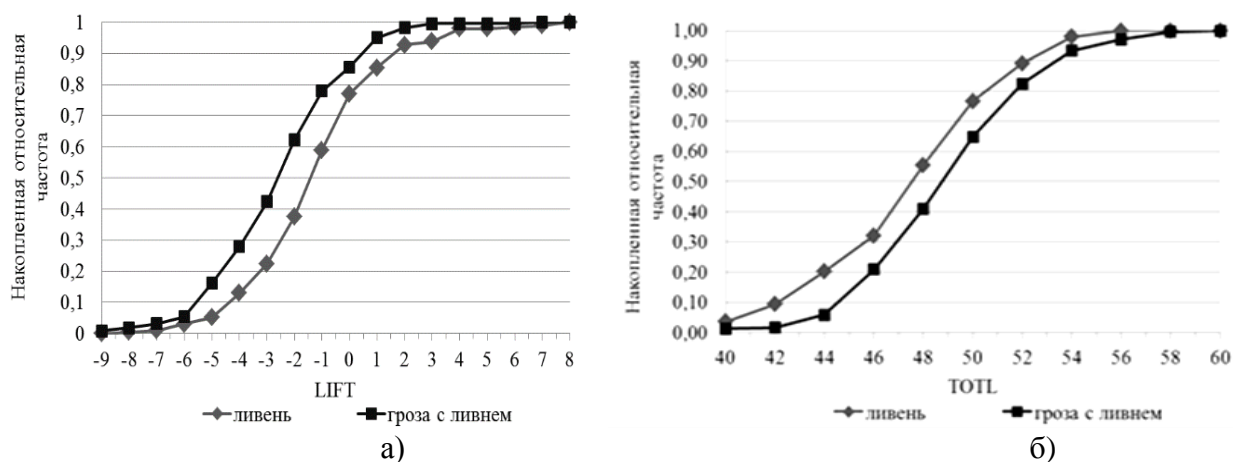


Рис. 1. Кумулятивная кривая за срок 12 ч BCB индекса LIFT (а) и индекса TOTL (б)

При одинаковых значениях индексов накопленная относительная частота ливней и гроз не одинаковая, а следовательно, и вероятность возникновения этих явлений будет отличаться (рис. 1, б).

Результатом данного исследования стали пороговые значения индексов для различной вероятности ливней и гроз (табл. 3).

Таблица 3
Пороговые значения индексов для различной повторяемости ливней и гроз для территории Амурской области

Индекс	50%	70%	90%
	Ливень		
LIFT	<-1	<-2	<-4
SWEAT	>170	>200	>240
KIND	>31	>33	>36
TOTL	>48	>49	>52
CAPE	>200	>400	>900
	Гроза		
	50%	70%	90%
LIFT	<-3	<-4	<-6
SWEAT	>190	>220	>280
KIND	>32	>35	>37
TOTL	>49	>51	>53
CAPE	>350	>700	>1300

По зарубежной классификации [10] значения индекса LIFT от -6 до -3 °С характеризуют атмосферу как «неустойчивую» и регистрируются ливни и грозы, а при значениях <-6 °С («сильно неустойчивая») на всей территории регистрируются интенсивные ливни, грозы, град. Для территории Амурской области градация значения индекса LIFT начинается с пределов от -4 до -2 °С (табл. 3), при этих значениях регистрируется ливень, от -6 до -4 °С – гроза. Пороговые значения индексов LIFT, SWEAT и CAPE (табл. 3) сравнимы с описываемыми в зарубежной литературе и существенно отличаются от значений, полученных для территории Западной Сибири [11, 12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований изучены особенности развития опасных конвективных явлений в районе космодрома «Восточный». На основе информации об опасных конвективных явлениях погоды, таких как гроза и ливень, были получены термодинамические индексы неустойчивости атмосферы.

В результате сравнения параметров конвекции в районе исследования обнаружено, что осредненные значения индексов при состояниях атмосферы «отдельные грозы» и «повсеместные грозы» имеют незначимые различия.

При сравнении средних значений индексов в дни, когда наиболее опасное конвективное явление характеризуется как «ливень» и как «гроза с ливнем», обнаружены различия между значениями индексов LIFT, SWEAT и CAPE. Но рассчитанные средние значения индексов отличаются от интервалов значений индексов, приведенных в литературе для Западной Сибири, и не отличаются от значений индексов при грозе и ливне для Европы. Причинами тому, возможно, являются близость территории к океану и большая неустойчивость воздушных масс.

Также определены пороговые значения индексов, при которых наблюдается развитие ливней или грозы в сопровождении ливня. Это значения, при которых грозу или ливень можно спрогнозировать с вероятностью 70 или 90%.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки альтернативных методов прогноза опасных конвективных явлений в радиусе 200 км над территорией космодрома «Восточный», а также при подготовке и пуске РКН на стартовых комплексах.

Список используемых источников

1. Горбатенко В.П., Еришова Т.В., Клипова О. А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестник ТГПУ. – 2012. – № 122(7). – С. 9–13.
2. Институт космических исследований РАН «Погода России»: Архив погоды / Институт космических исследований РАН «Погода России». – Электрон. дан. – М., 2011.
3. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»: Специализированные массивы для климатических исследований / ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – Электрон. дан. – Обнинск, 2008.
4. University of Wyoming: Department of Atmospheric Science / University of Wyoming. – Электрон. дан. – Вайоминг, 2010.
5. Andersson, T. A. M. J. C. N. S.: Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // Meteorol. Mag. – 1989. – Vol. 116. – P. 141–146.
6. Johns R.H., Doswell C.A. Severe local storms forecasting. Wea. Forecasting. – 1992. – P. 558–612.
7. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // Wea. Forecasting. – 1989. – Vol. 4. – P. 73–80.
8. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – Vol. 7. – P. 327–342.
9. Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A. Mesoscale convection and dangerous weather phenomena in southeast of Western Siberia // 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1–4, 2011, Chengdu, China. Beijing: Tsinghua University. – 2011. – P. 160–164.
10. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере западной Сибири / В.П. Горбатенко, Д.А. Константинова, О.И. Золотухина, Е.Л. Тунаев // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11/3. – С. 148–155.

11. Горбатенко В.П., Громницкая А.А., Золотухина О.И. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома «Восточный» // Вестник ТГУ. – 2015. – № 400. – С. 330–337.
12. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири / В.П. Горбатенко, С.Ю. Кречетова, М.Ю. Беликова, О.В. Разумова // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 12. – С. 17–21.

В.В. Кальчихин*,
кандидат физико-математических наук;
А.А. Кобзев*,
кандидат технических наук;
П.М. Нагорский*,
доктор физико-математических наук, профессор;
М.В. Оглезнева*;
К.Н. Пустовалов*,
кандидат физико-математических наук;
С.В. Смирнов*,
кандидат физико-математических наук;
Д.Е. Филатов*

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

ДИНАМИКА СПЕКТРА АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ВО ВРЕМЯ ВЫПАДЕНИЯ ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ

Во время интенсивных ливневых осадков, обусловленных прохождением мощной конвективной облачности, проведено исследование спектрального состава вариаций метеорологических и атмосферно-электрических параметров приземной атмосферы. Для серии Сb, сопровождаемых интенсивными ливневыми осадками, проанализированы вейвлет-спектры высокочастотных (с периодами менее 10 мин) вариаций структуры выпадающих осадков (по интенсивности и диаметру), а также выявлены согласованные вариации между потоком гидрометеоров, полярными электропроводностями λ_{\pm} и градиентом потенциала ϕ напряженности электрического поля E .

Ключевые слова: грозовые явления, ливневые осадки, напряженность электрического поля, полярные электропроводности.

ВВЕДЕНИЕ

Опасные явления (ОЯ) в приземной атмосфере оказывают существенное влияние на безопасность транспортной и энергетической инфраструктур, а также промышленности. Известно, что электрические характеристики приземного слоя атмосферы ($\nabla\phi$ – градиент напряженности электрического поля E , λ_{\pm} – полярные электропроводности) весьма чувствительны к ОЯ, особенно к кучево-дождевой облачности (Сb) и ливневым осадкам. Электрическая структура приземного слоя в условиях «хорошей» погоды достаточно исследована [1–3]. Менее изучены процессы при нарушении условий «хорошей» погоды [4, 5]. К их числу относятся интенсивные ливневые осадки. Работа посвящена исследованию спектра вариаций ливневых осадков совместно с изменением электрического состояния приземной атмосферы.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В Геофизической обсерватории (ГО) ИМКЭС СО РАН [<http://www.imces.ru/index.php?rm=news&action=view&id=899>], расположенной в г. Томске, ведутся геофизические, метеорологические и экологические исследования, осуществляются испытание и сравнение новых приборов и технологий. Схема расположения аппаратуры в основном пункте ГО представлена на рис. 1. Помимо основного пункта, в ГО функционируют в режиме мониторинга выносные пункты, расположенные на удалении от 6 до 60 км. Мониторинг с высоким временным раз-

решением атмосферно-электрических, актинометрических и метеорологических величин, включая турбулентность, ведется в Геофизической обсерватории, начиная с 2006 года.

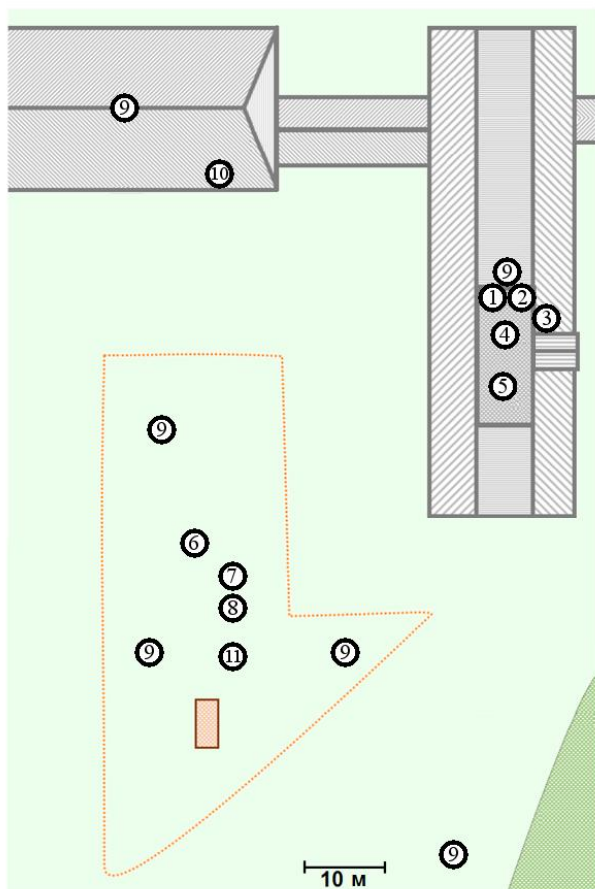


Рис. 1. Схема расположения аппаратуры в ГО ИМКЭС СО РАН:

1 – автоматическая метеостанция WXT520; 2 – счетчик легких ионов «Сапфир-3М»; 3 – измеритель полярных электропроводностей атмосферы «Электропроводность-2»; 4 – датчики температуры, влажности и давления; 5 – пиранометр CM-11, радиометры NILU-UV-6T и M-124; 6 – флюксметры «Поле-2» и CS100; 7 – оптический осадкомер ОПТИОС; 8 – челночный осадкомер; 9 – автоматические метеостанции АМК-03; 10 – нефелометр 3563, измерители спектра аэрозольной компоненты APS 3321 и SMPS 3936; 11 – осадкомер О-1

Измерения атмосферно-электрических величин и характеристик ливневых осадков осуществляются следующими приборами:

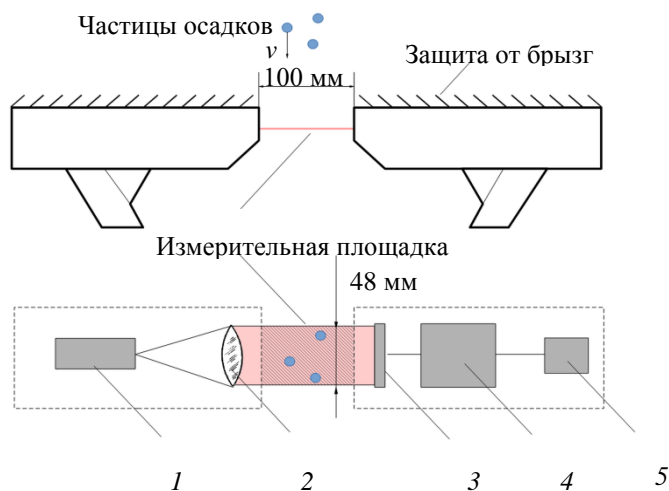
- а) флюксметрами «Поле-2» и CS100, «Электропроводность-2», «Сапфир-3М»;
- б) оптическим осадкомером ОПТИОС, метеорологической станцией WXT520 (Vaisala), челночным осадкомером Davis Rain Collector, стандартным осадкомером О-1 с ветровой защитой Третьякова.

ОПТИОС разработан в ИМКЭС СО РАН [6, 7] в качестве блока измерения осадков для автоматической метеорологической станции АМК-03 и ее модификаций [8]. Общий вид прибора представлен на рис. 2,а. Работа прибора основана на применении принципа получения и анализа теневых изображений частиц осадков. Для его реализации применяется схема, где плоский горизонтальный коллимированный световой поток от источника попадает на линейный сенсор, формируя горизонтальную измерительную площадку (рис. 2,б).

Частота опроса линейного сенсора (~ 20 кГц) обеспечивает регистрацию и определение горизонтального размера сечений частиц осадков по мере их прохождения сквозь измерительную площадку. На основе анализа размеров и количества полученных сечений определяются микроструктурные параметры осадков – распределение частиц осадков по размерам ($N(D)$, где D – диаметр в диапазоне 0,2–7,0 мм) и скорости падения (v , м/с), а также интегральные характеристики – интенсивность осадков (I , мм/ч) и их сумма (Q , мм). Компоненты источника и приемника защищены от воздействия окружающей среды корпусами, снабженными оптическими окнами и защитой от брызг. Размер измерительной площадки составляет 48 см².



а



б

Рис. 2. Оптический осадкомер ОПТИОС (на заднем плане) и флюксметр CS110 (на переднем): а – внешний вид приборов; б – функциональная схема ОПТИОС; 1 – источник оптического излучения; 2 – система оптических линз; 3 – линейный сенсор; 4 – блок формирования измерительной информации; 5 – выходной интерфейс

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА И ИХ АНАЛИЗ

Примеры вариаций интенсивности ливневых осадков I , отрицательной полярной электропроводности λ_- и напряженности электрического поля $E = -\nabla\phi$ приведены на рис. 3 для двух, принципиально различных случаев проявления грозовой активности: внутримассовой и фронтальной. Представленные случаи являются типичными примерами прохождения Cb с интенсивными ливневыми осадками, зарегистрированными в 2018–2019 годах. В случае 18 августа 2019 года зарегистрирована внутримассовая ситуация в умеренной воздушной массе (Cb , Ac , Si , ливневые осадки), а в случае 04 июня 2019 года – окклюзия циклона на арктическом фронте (Cb , ливневый дождь).

Поскольку вариации N , D , E и λ_- имеют интенсивную флуктуационную составляющую с периодами менее 10 мин, то для ее анализа было использовано вейвлет-преобразование, позволившее провести оценку спектральных составов и временной динамики отфильтрованных в полосе $f_b = 1/20 \text{ с}^{-1}$, $f_n = 1/1200 \text{ с}^{-1}$ вариаций напряженности поля $E_F(t)$ и числа капель за 5-секундный интервал $N_F(t)$, где t – время. Ряды λ вейвлет-преобразованию не подвергались, потому что такт съема этих данных составил $\tau = 30 \text{ с}$. Результаты спектрального анализа представлены на рис. 3 в виде яркостных спектрограмм (нижние панели). В качестве базового вейвлета был использован комплексный вейвлет Морле.

Анализ вейвлет-спектрограмм показал, что в этом диапазоне масштабов (периодов T) $T \sim 1/3$ –20 мин выделяются три основные полосы. Для первой из них периоды вариаций обеих величин T менее 1–2 мин весьма близки или практически совпадают.

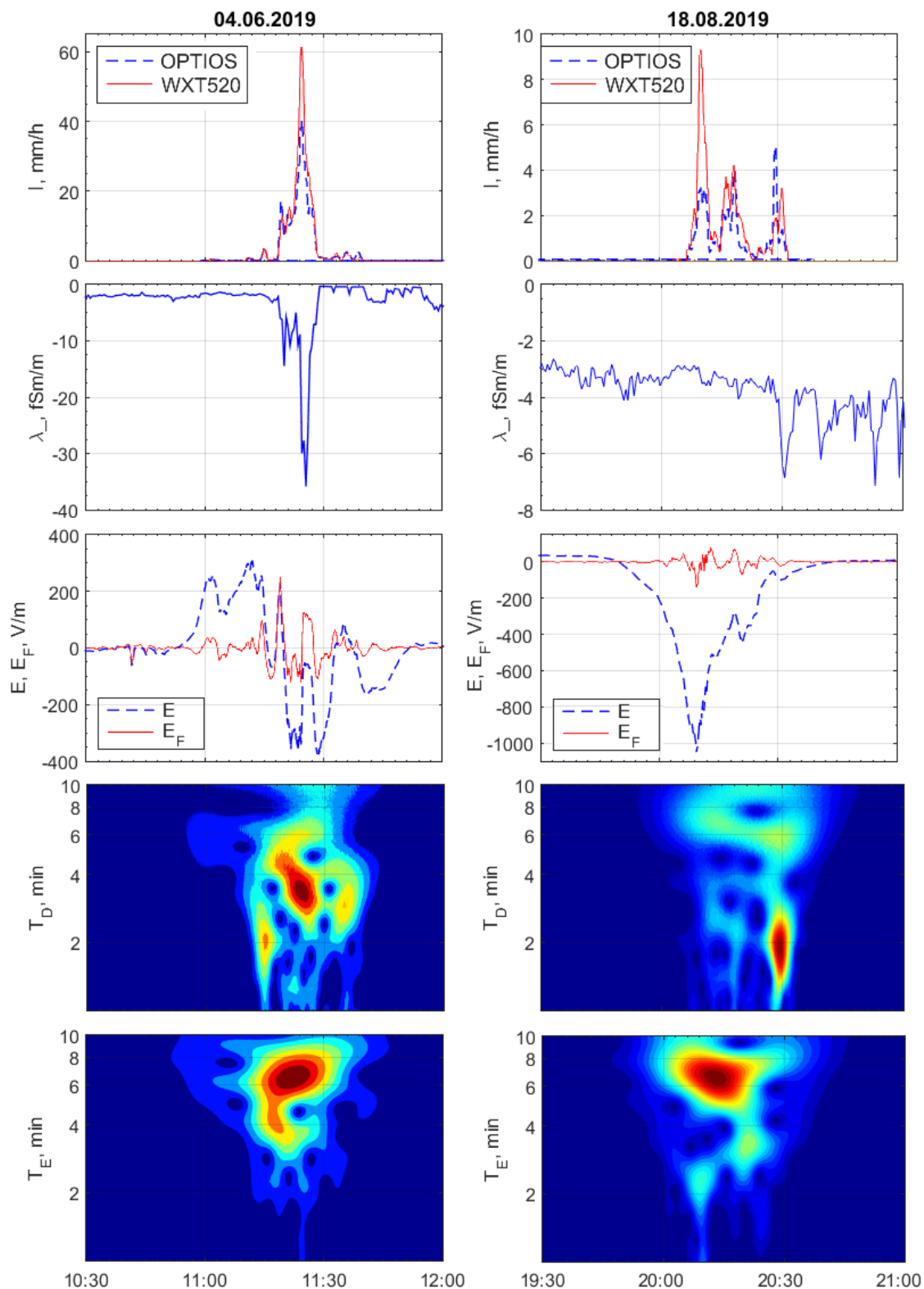


Рис. 3. Вариации интенсивности I , отрицательной электропроводности λ_- , напряженности поля E , E_F и спектрального состава N_F , E_F во время ливневых осадков; ось абсцисс – местное время

Вариации $N_F(t)$ и $E_F(t)$ в этой полосе периодов появляются, как правило, во время интенсивной молниевой активности, их длительность весьма непродолжительна, а интенсивность

спектральных составляющих невелика. Для второй полосы периоды ($T \sim 1,5\text{--}3$ мин) обоих анализируемых процессов также весьма близки, однако для $E_F(t)$ они менее интенсивны, чем для $N_F(t)$. Для внутримассовой облачности, по сравнению с фронтальной, третья полоса периодов N_F смещена в сторону больших значений $T \sim 5\text{--}10$ мин, для фронтальной облачности она составляет $T \sim 4\text{--}6$ мин. Для напряженности поля в обоих случаях третья полоса периодов лежит в диапазоне $T \sim 5\text{--}8$ мин.

Данные измерений, представленные на рис. 2 (2-я сверху панель), показывают, что вариации отрицательной электропроводности приземной атмосферы принципиально различны в случае выпадения ливневых осадков при прохождении фронтальной и внутримассовой типов облачности. Результаты анализа этого явления представлены на рис. 4 и 5.

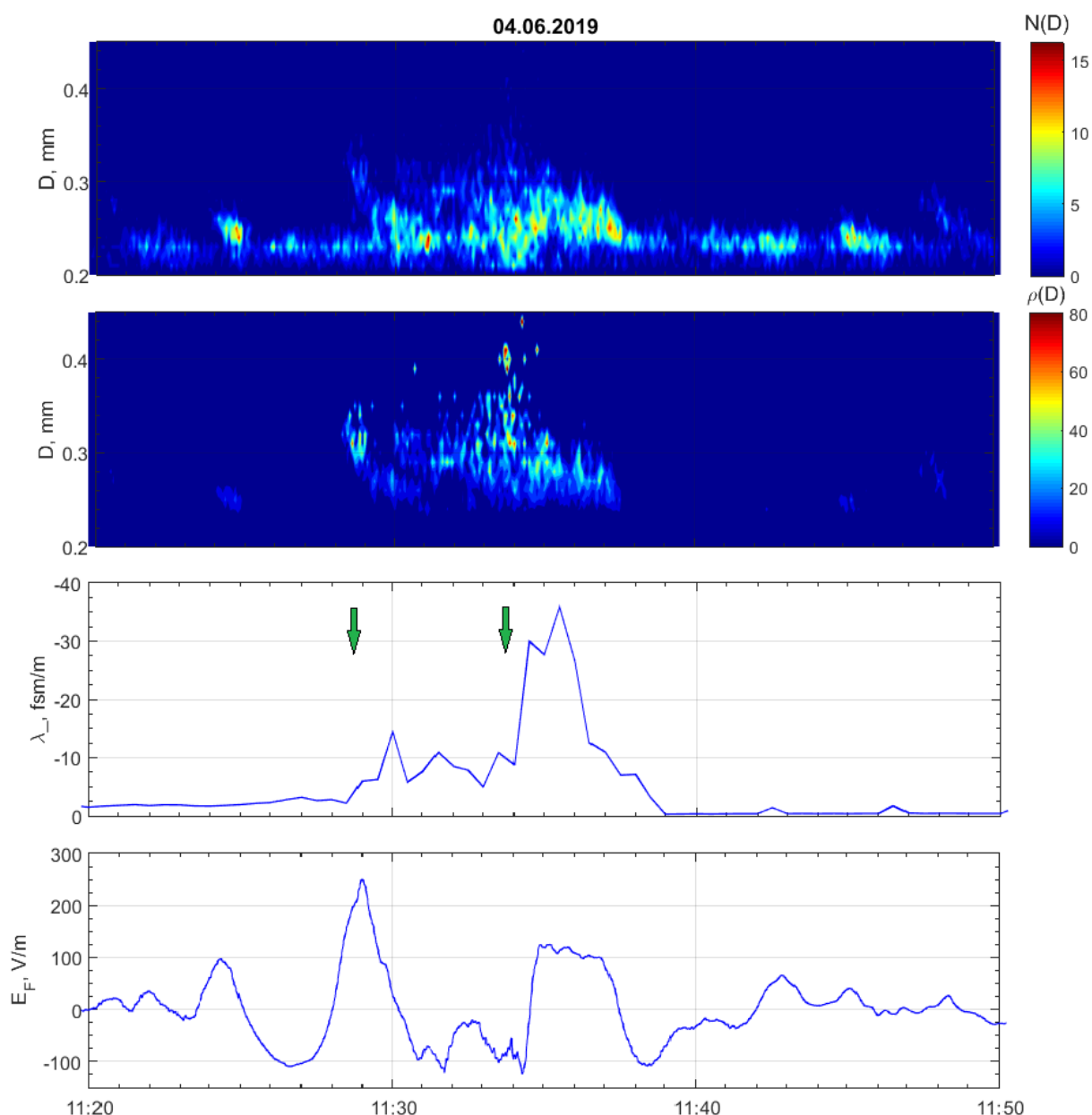


Рис. 4. Фронтальная облачность. Панели (сверху – вниз): распределения гидрометеоров $N(D,t)$ и массы воды $\rho(D,t)$ в условных единицах, вариации $\lambda_-(t)$, отфильтрованные вариации $E_F(t)$; ось абсцисс – местное время, стрелки – начало реакции $\lambda_-(t)$ на осадки

Для построения двумерных распределений плоскость 'диаметр капли – время (D, t)' была разбита на ячейки размером $\Delta D = 0,1$ мм, $\Delta t = 5$ с. Такое разбиение позволило исследовать как временную структуру числа капель ливня, так и динамику спектра размеров зарегистрированных капель. В ряде случаев зарегистрировано двух- или более модовое распределение выпадающих капель по размерам.

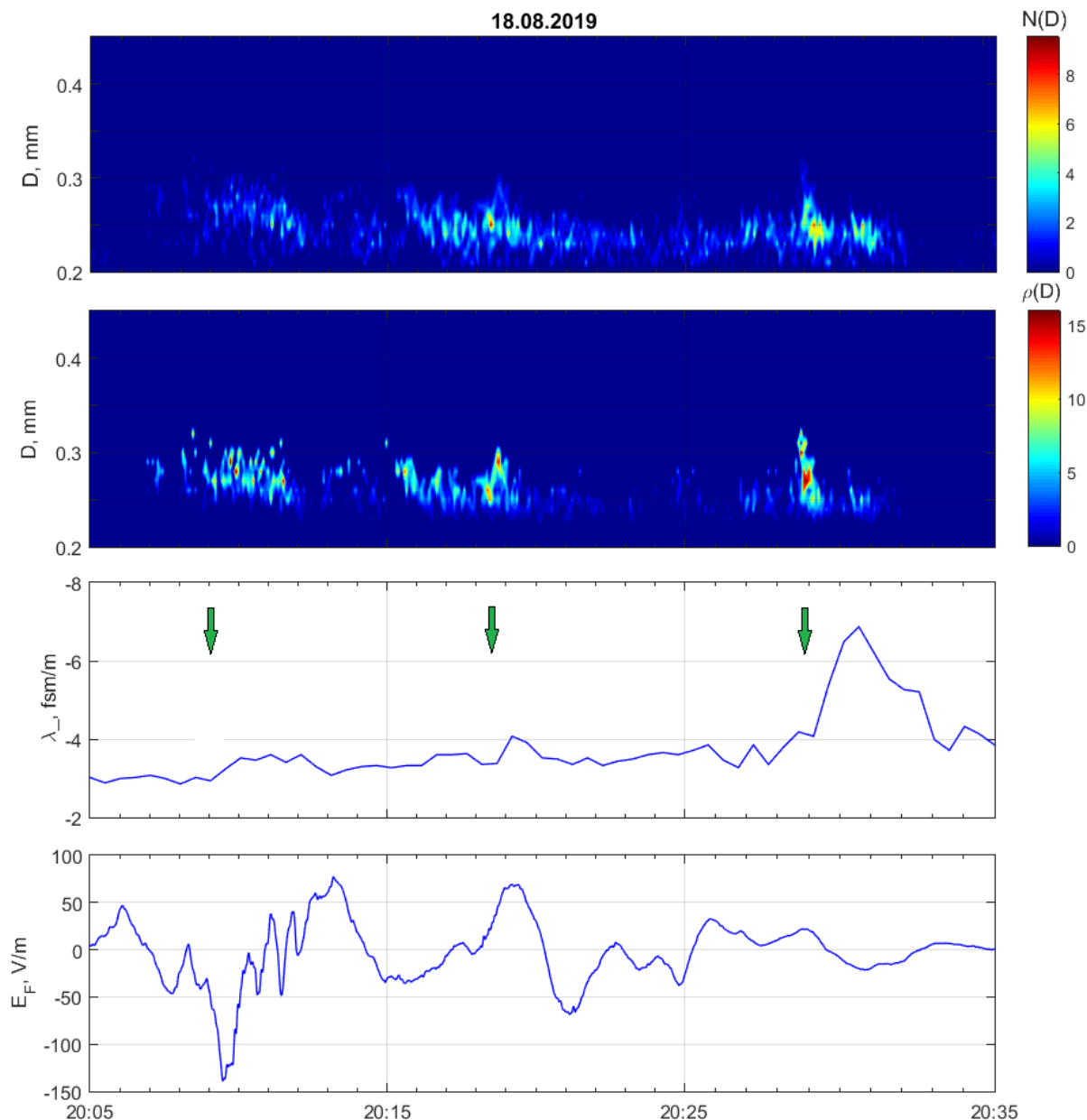


Рис. 5. Внутримассовая облачность (обозначения на рис. 5 аналогичны обозначениям, представленным на рис. 4)

Анализ представленных на рис. 4 и 5 данных показывает, что резкая интенсификация потока гидрометеоров и появление в нем фракции капель с диаметром, превышающим 0,3 мм, приводят к возрастанию отрицательной полярной электропроводности. Характерные примеры указаны на обоих рисунках вертикальными стрелками. Из рассмотрения этих же рисунков следует, что чем меньше средний диаметр появившейся фракции, тем меньше возмущение полярных электропроводностей. Так, для 18 августа 2019 года первые два случая выпадения ливневых осадков (на рис. 5 – две левые стрелки) приводят к незначительному возрастанию λ_{-} , которое едва превышает уровень флуктуационной составляющей.

Появление в потоке фракции капель с $D > 0,3$ мм приводит к последующему возрастанию $\lambda_{\text{э}}$ почти в 2 раза (правая стрелка на том же рисунке). Наиболее ярко указанный эффект проявляется во время ливней, обусловленных фронтальной грозовой активностью. В этом случае возможно увеличение более чем на порядок (рис. 4).

Отметим, что время существования фракции капель, вызывающих увеличение $\lambda_{\text{э}}$, значительно меньше, чем время существования возмущения полярных электропроводностей $\delta\sigma$. По приведенным на рис. 4 и 5 данным $\delta\sigma$ не превышает ~ 4 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование спектрального состава вариаций атмосферно-электрических параметров приземной атмосферы и структуры осадков показало, что для их вариаций в диапазоне периодов 1–10 мин выделяются три полосы: а) $T \leq 1\text{--}2$ мин; б) $T \sim 1,5\text{--}3$ мин; в) $T \sim 5\text{--}10$ мин – для осадков при внутримассовой облачности, $T \sim 4\text{--}6$ мин – для фронтальной облачности, а для напряженности поля – $T \sim 5\text{--}8$ мин.

Установлено, что в случае выпадения ливневых осадков вариации электропроводности приземной атмосферы принципиально различны при прохождении фронтальной и внутримассовой кучево-дождевой облачности. Выявлено, что при диаметре капель более 0,3 мм возмущение $\lambda_{\text{э}}$ значительно возрастает.

Полученные результаты могут быть полезны как при исследовании детальной структуры конвективной облачности, сопровождаемой интенсивными ливневыми осадками, так и при разработке методов и средств прогноза и контроля грозовых и ливневых явлений.

Работа финансово поддержана Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0205, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60718X0205).

Список используемых источников

1. Hoppel W.A., Frick G.M. Ion-aerosol attachment coefficients and the steady state charge distribution on aerosols in a bipolar environment // Aerosol Sci. and Tech. – 1986. – Vol. 5, № 1. – P. 1–21.
2. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Теория электрических явлений в атмосфере. – Изд-во LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG Germany, 2012. – 330 с.
3. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A. Electrodynamics properties and height of atmospheric convective boundary layer // Atmospheric Research. – 2017. – Vol. 194. – P. 119–129.
4. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 323 с.
5. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – Vol. 172. – P. 33–39.
6. Detection of microstructure characteristics of liquid atmospheric precipitation with the optical rain gage / V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, V.A. Korolkov, A.A. Tikhomirov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016. – Vol. 29, №. 3. – P. 304–307.
7. Results of optical precipitation gage field tests / V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, V.A. Korolkov, A.A. Tikhomirov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2018. – Vol. 31, № 5. – P. 545–547.
8. Bogushevich A. Y. Methodology of monitoring the temperature and wind stratification in the atmospheric boundary layer based on multilevel ultrasonic measurements // Proc. SPIE 9680, 21st Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 96806F. – 2015. – 19 November.

В.Г. Каплин*,
доктор биологических наук, профессор;

Т.В. Корнилов*;

Д.А. Кочин**;

В.Г. Федченко**,
кандидат технических наук;

Е.Ф. Чичкова**,
кандидат географических наук

*Всероссийский научно-исследовательский институт
защиты растений, г. Санкт-Петербург.

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

ЭШЕЛОНИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ЛЕСОСТЕПИ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

Проведен анализ данных эшелонированного мониторинга опытного поля Самарского ГАУ в окрестностях пос. Угорье Кинельского района. Рассчитаны индексы вегетации на основе данных космической съемки WorldView-3, синхронных описаний состояния и засоренности посевов тритикале (*xTriticosecale*), измерений спектральной отражательной способности культуры и доминирующих видов сорных растений. Выявлены особенности пространственного распределения индексов вегетации в зависимости от состояния и засоренности посевов культуры на опытном поле. Намечены пути исследований в области эшелонированного мониторинга посевов.

Ключевые слова: эшелонированный мониторинг, спектральная яркость, спутниковые данные, индексы вегетации, наземные наблюдения.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках совместной реализации поисковой тематики по разработке дистанционных методов фитосанитарного мониторинга сорной растительности для технологии дискретного внесения средств защиты растений специалистами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) и Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (ВИЗР) на опытно-демонстрационном стационаре ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет» (ГАУ) в 2018 и 2019 годах были выполнены экспериментальные работы по фитосанитарному мониторингу сорной растительности.

В качестве метода проведения исследований был применен метод эшелонированного мониторинга. Эшелонированный мониторинг предполагает наличие нескольких уровней измерений и наблюдений характеристик растительного покрова, а именно: использование данных высокого пространственного разрешения со спутников, измерений беспилотных летательных аппаратов, наземных измерений и наблюдений [1]. В этой работе представлены и проанализированы материалы двухуровневой съемки (спутниковой и наземной). Анализ полученных данных должен помочь созданию и обоснованию методики дистанционного мониторинга для дискретного внесения средств защиты растений [2, 3].

ПОЛЕВЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ

Полевые обследования опытного поля, засеянного в первой декаде сентября 2018 года озимой культурой тритикале (*xTriticosecale*), проведены в первой декаде июня 2019 года и состояли из двух частей. На первом этапе проводилось исследование горизонтальной структуры растительности поля с выделением пятен доминирующих группировок сорняков, указанием их размеров, установлением маркеров и координат участков, оценкой численности и проективного покрытия культуры и видов сорняков в 3-кратной повторности на каждом из участков (табл. 1). На втором этапе проводились измерения спектральной яркости культуры и доминирующих видов растений.

На опытном поле тритикале были выявлены 14 микрогруппировок, включавших 16 видов сорных растений, которые относились к корнеотпрысковым многолетним травам; травянистым двулетникам или многолетникам; озимым, зимующим, ранним и поздним яровым однолетникам. Среди них преобладали микрогруппировки с доминированием травянистого двулетника, реже – многолетника смолевки карликовой (*Silene nana*) и позднего ярового однолетника мари белой (*Chenopodium album*), на долю которых приходилось 65% выявленных группировок. Пример данных по учетной площадке 1, собранных на основе полевых описаний и измерений, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Пример данных учета сорняков (5.06.2019 г.)

Номер учетной площадки	Размер пятна, м	Сорняки		
		Вид растения	Проективное покрытие, %	Численность, экз./м ²
1	2,5 x 3,0	Тритикале (культура)	5; 5; 15	8; 4; 8
		Латук или молокан татарский	0; 3; 0	0; 4; 0
		Смолевка карликовая	60; 80; 40	152; 240; 112
		Незабудка полевая	0,1	ед.
		Марь белая	1; 1; 0	12; 4; 0
		Щирица жминдовидная	1; 0; 0	12; 0; 0
		Ярутка полевая	0,1	ед.
		Горец выюнковый	5; 0; 0	4; 0; 0
		Резушка	0; 0; 5	0; 0; 1

Для проведения полевых измерений в качестве приборной части наземных исследований использовался полевой спектрорадиометр PSR-1100. Спектрорадиометр PSR-1100 представляет собой дисперсионную систему персонального информационного устройства, работающего в диапазоне 320–1100 нм. На основе проведенных измерений спектральных характеристик различных видов растительности были собраны материалы для создания библиотеки спектральных образов объектов территории опытного поля.

Основные особенности класса растительности в спектральной отражательной способности состоят в следующем: характерные максимум в зеленой (0,55 мкм) и минимум в красной (0,66 мкм), а также резкое увеличение отражения в ближней инфракрасной зоне. Эти особенности характерны для всех типов выбранных растений сорняков и тритикале (рис. 1).

Каждая кривая имеет свой идентификационный номер, соответствующий номеру обработанного значения из записи при измерении прибора PSR-1100. Под этими номерами спектральные кривые хранятся в библиотеке спектральных образов растительности. Аналогичные данные собраны в библиотеке спектральных образов Самарского полигона для 16 видов сорных растений за весь период проведения экспедиционных работ. Анализ представленных на рис. 1 графиков показывает, что по спектральным значениям яркости не существует признаков для надежного распознавания сорных растений.

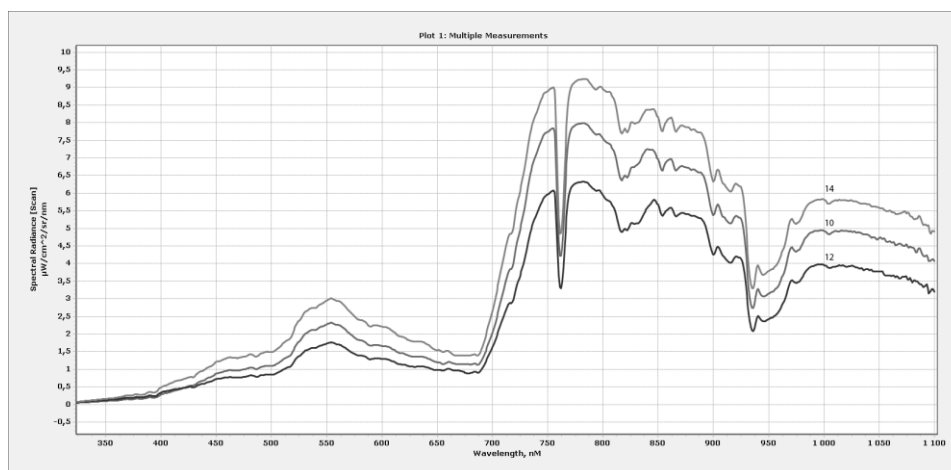


Рис. 1. Спектральные образы растений, преобладающих на опытном поле 5-6 июня 2019 года; 14 – марь белая, 10 – смолевка карликовая, 12 – тритикале

АНАЛИЗ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Исходными материалами дистанционного зондирования Земли из космоса являлись снимки космического аппарата (КА) КА *WorldView-3*. Выбор данных КА *WorldView-3* продиктован ориентированностью параметров съемки этих спутников на решение задач оценки состояния лесов и сельскохозяйственных угодий. Наличие на борту КА аппаратуры высокого пространственного разрешения (панхроматическое изображение с пространственным разрешением 0,5 м и мультиспектральное изображение с пространственным разрешением 2,0 м), а также уникальная возможность получения 8-канальной съемки (b1- Coastal, b2- Blue, b3 - Green, b4- Yellow, b5 -Red, b6- Red Edge, b7- Nir-1, b8-Nir-2) позволяют считать эту съемку лучшей в настоящее время для анализа растительного покрова. Балл облачности – ниже 3. Дата съемки – 07.06.2019.

По полученным спутниковым данным были рассчитаны характеристики различных вегетационных индексов [4]:

– $NDVI = (b7 - b5) / (b7 + b5)$ – нормализованный разностный вегетационный индекс (рис.2,а);

– $PSSR = (b7 - b1) / (b7 + b1)$ – простой индекс характерных пигментов, созданный для мониторинга здоровья растительности, обнаружения их стрессового состояния и производства сельскохозяйственных культур (рис.2,б);

– $SIPI = (b7 - b1) / (b7 + b5)$ – индекс структурных нечувствительных пигментов, созданный для увеличения чувствительности обнаружения в соотношении объемных каротиноидов (например, альфа-каротина и бета-каротина) и стрессоустойчивости (рис.3,а);

– $FCI = (b7 - b6) / (b7 + b6)$ – индекс лесов и урожаев FCI, использующий информацию канала крайнего красного диапазона спектра, который оптимально подходит для наблюдения и анализа состояния растительного покрова (оценка содержания хлорофилла, протеина и азота; рис. 3,б).

Визуализация этих индексов (рис. 2 и 3) произведена по цветовой шкале, разработанной для NDVI (рис. 3,а). В красной области спектра (0,63–0,69 мкм, канал b5) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,77–0,89 мкм, канал b7) находится область максимального отражения кле-

точных структур листа (рис. 1). Поэтому для подтверждения высокой степени фотосинтетической активности растительности традиционно используется индекс NDVI.

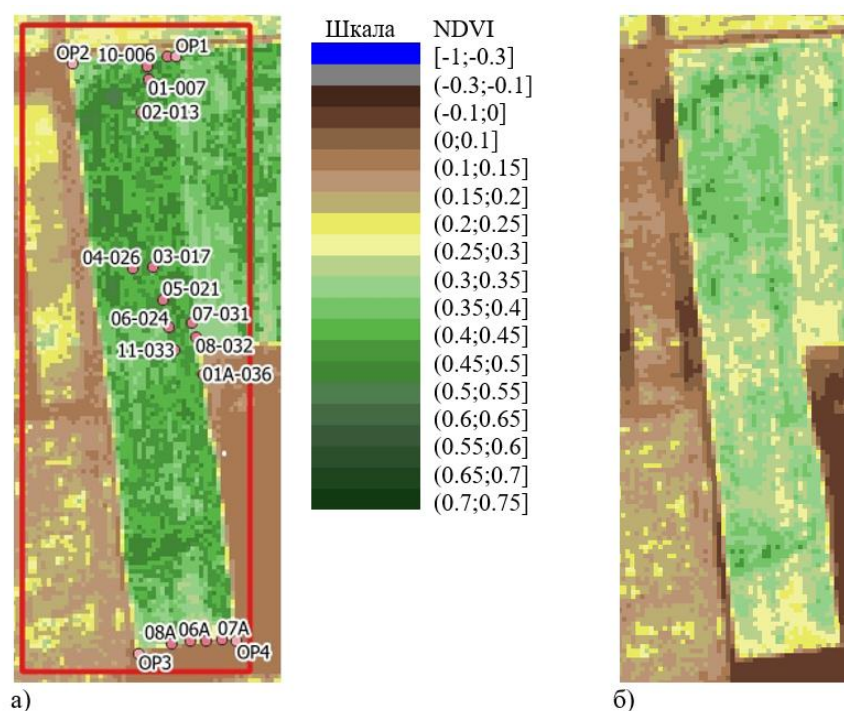


Рис. 2. Опытное поле с тритикале:
а – NDVI; б – PSSR

При сверке всех рассчитанных вегетационных индексов в маркированных точках на 16 учетных площадках (рис.2,а) с данными наземных наблюдений (см. табл. 1) были получены следующие результаты.

1) Наибольшие значения NDVI (0,65–0,70) и максимальные значения всех индексов соответствуют площадке 1, где преобладает сорняк смолевка карликовая (см. табл. 1) с большим проективным покрытием поверхности от 40 до 80%, а численность основной культуры тритикале составляет 4–8 растений на квадратный метр.

2) На площадках с высоким значением NDVI от 0,55 до 0,65 (2, 4, 5) преобладает сорняк смолевка карликовая при наличии сорняка марь белая, но растений тритикале насчитывается от 12 до 48 на квадратный метр, т. е. достаточно много.

3) При более низких значениях NDVI от 0,50 до 0,55 на участках 6, 7, 8 численность тритикале составляет наибольшие значения от 20 до 72 на квадратный метр.

4) На участках 01А, 04А, 06А, 07А, 08А, расположенных на бровке поля, значения NDVI, как и значения всех индексов вегетации, резко снижаются, что свидетельствует о разреженном растительном покрове и частичном захвате прибором отражением от почвы.

5) Высокое значение NDVI (0,50) и низкое значение FCI (рис.3,б) соответствуют 8-й площадке, где преобладает сорняк марь белая (от 120 до 320 значений по численности на квадратный метр участка), также занижен фон FCI на 2-м, 5-м участках относительно высоких NDVI, что позволяет сделать предположение о перспективе исследования индекса FCI для задач идентификации сорняков. Индексы PSSR (рис. 3,б) и SIPI (рис.3,а) высоко коррелированы со значениями NDVI по имеющейся выборке значений, но распределение каждого индекса имеет свои специфические особенности, требующие дополнительных исследований, в том числе и полевых.

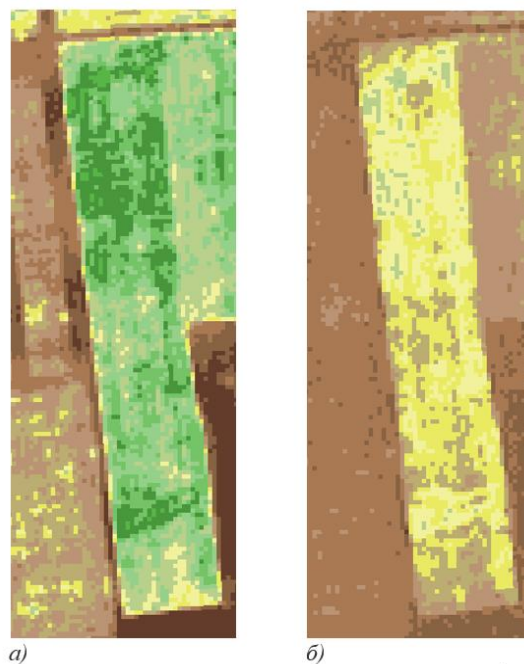


Рис. 3. Опытное поле с тритикале:
а – SIPI; б – FSI

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективы относительно возможности использования индексов вегетации, полученных по данным космической съемки высокого пространственного разрешения, заключаются в проведении дальнейших аналогичных исследований с учетом различных фазовых состояний культурных и сорных растений. Также перспективы эшелонированного мониторинга состоят в подключении среднего звена – данных беспилотных летательных аппаратов.

Авторы выражают признательность за оказанную помощь при проведении данного исследования руководителю отдела пространственных данных ООО «ПТЕРО» *Дмитрию Александровичу Грядунову*.

Список используемых источников

1. Эшелонированный мониторинг территорий водосборов рек Селезневки и Сестры / Н.В. Кобелева, Д.А. Кочин, Д.М. Рыжиков и др. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2019. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru> (дата обращения: 2.02.2020).
2. Новые методы дистанционного мониторинга / А.К. Лысов, Т.В. Корнилов, В. Г. Федченко, М.П. Хабаров // Защита и карантин растений. – 2008. – № 2. – С. 54–55.
3. Корнилов Т.В., Лысов А.К. Цифровые технологии дистанционного мониторинга для дискретного внесения средств защиты растений // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 98. – С. 17–27.
4. Penuelas J., Baret F. and Filella I. Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids / Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance / *Photosynthetica* 31 (1995): 221–230.

Т.И. Клещёва*,
кандидат географических наук;
М.С. Пермяков*,
доктор физико-математических наук;
Е.Ю. Поталова*,
кандидат географических наук

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

МОНИТОРИНГ ТАЙФУНОВ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ МОЛНИЙ

В работе представлены методы оценок характеристик центральной облачной стены тайфунов (положение центра, радиус, радиусы внутренней и внешней границ, ширина) по данным глобальной сети локализации молний (WWLLN) в северо-западной части Тихого океана с 2011 по 2015 гг. Характеристики облачной стены тайфунов сравнивались с координатами центров, радиусами максимального ветра и глаза, полученными по данным дистанционного зондирования (скаттерометера ASCAT), Японского метеорологического агентства (JMA) и американского Объединенного центра предупреждения тайфунов (JTWC).

Ключевые слова: тропические циклоны, тайфуны, облачная стена глаза тайфуна, радиус максимального ветра, радиус облачной стены, сети локализации молний, плотность разрядов молний.

ВВЕДЕНИЕ

Опасные явления погоды, связанные с тропическими циклонами (ТЦ), мезомасштабными конвективными системами и комплексами, фронтами, сопровождаются мощной кучево-дождевой облачностью и высокой грозовой активностью, проявляющейся электрическими разрядами внутри облаков и разрядами облако – Земля. Поэтому в последние десятилетия для мониторинга таких явлений всё шире применяются дистанционные методы пассивной радиолокации молний с помощью сетей наземных станций приема электромагнитных импульсов, излучаемых молниями (атмосфериков), в системах локализации молний (или в грозопеленгационных системах). Пространственное распределение молний и их частота служат индикатором областей интенсивной влажной конвекции от отдельных грозowych ячеек до мезомасштабных конвективных комплексов, которые являются неотъемлемыми элементами структуры опасных погодных систем. По изменениям полей молниевой активности в области влияния этих погодных систем прослеживаются изменения в их структуре на всех стадиях развития [1–4, 12].

Типичной мезомасштабной структурой в центральной области зрелых тропических циклонов является кольцо мощных кучевых облаков, так называемая облачная стена, которая окружает практически свободную от облачности внутреннюю область – глаз тайфуна. Облачная стена и глаз тайфуна образуют внутреннюю активную зону тайфунов и ураганов, где наблюдаются максимальные ветры и горизонтальные градиенты давления и температуры и ливневые осадки. Характеристики этой зоны, включая координаты центра, максимальный ветер и его радиус, радиус глаза, являются основными для штормовых сводок. Эти характеристики используются в моделях начального вихря для инициализации схем численного прогноза ТЦ, в том числе с использованием региональных мезомасштабных моделей высокого разрешения типа WRF (Weather Research and Forecasting Model). Поэтому для их оценок создано большое число методик, использующих в основном данные дистанционного зондирования и изображения ТЦ из космоса в различных диапазонах – видимом, инфракрасном, микроволновом [9, 11, 16].

В настоящей публикации представлены методы и результаты оценок характеристик облачной стены тайфунов в северо-западной части Тихого океана в период с 2011 по 2015 гг. по данным глобальной сети локализации молний WWLLN (World Wide Lightning Location Network). Оценивались положение центра тайфунов, радиус глаза, радиусы внутренней и внешней границ облачной стены и ее ширина, которые затем сравнивались с аналогичными, полученными по данным ветра скаттерометров ASCAT (спутники METOP), данными архивов Японского метеорологического агентства (JMA) и Объединенного центра предупреждения тайфунов (JTWC).

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

Сведения о тропических циклонах были получены из данных бест треков, предоставляемых JMA [7] и JTWC [8]. Характеристики ТЦ в бест треках определяются методом Дворака [14] и даются с 6-часовым интервалом, за исключением дней их наибольшей интенсивности, когда интервал уменьшается до 3 ч. В работе использовались координаты центров ТЦ (широта и долгота), также из данных JTWC – радиусы максимального ветра и радиусы глаза ТЦ. Были выбраны тропические циклоны за период 2011–2015 гг., прошедшие в северо-западной части Тихого океана, вдали от побережья материка и крупных островов и в своей эволюции достигали интенсивности тайфунов (скорость ветра $\geq 33 \text{ мс}^{-1}$) или супер-тайфунов (скорость ветра $\geq 67 \text{ мс}^{-1}$). Этим критериям соответствовали 54 ТЦ, из них 28 супер-тайфунов и 26 тайфунов.

Для каждого ТЦ вдоль его траектории в области радиусом 100 км от центра и за весь период его существования выбирались данные сети WWLLN [17]. Они включают в себя момент времени отдельного разряда облако – Земля с точностью до микросекунды и его координаты. Среднее (медианное) значение погрешности координат положения молний в WWLLN составляет 4,3 км (3 км), а диапазон ошибок на уровне 0,5 от максимума распределения составляет от 1 до 6 км [6]. Эффективность обнаружения молний (отношение молний, зарегистрированных глобальной сетью WWLLN, к количеству молний, наблюдаемых региональными сетями) изменяется в широком диапазоне ~ 1 –10% и достигает $\sim 50\%$ для разрядов с током свыше 40 кА [6]. Для анализа структуры полей молний в облачной стене для выборок определенной длительности (от 30 мин до суток) строились распределения молниевых разрядов относительно центра ТЦ. Для этого положение каждого разряда в выборке пересчитывалось в прямоугольную систему координат с началом в центре ТЦ, координаты которого на момент времени разряда определялись по данным JMA с помощью сплайновой интерполяции [1, 2, 4]. Для дальнейшего анализа были выбраны ТЦ, достигшие интенсивности тайфуна, в суточных распределениях которых можно было выделить кольцевые структуры или их части в центральной области. Примеры таких суточных распределений молний в некоторых тайфунах показаны на рис. 1. Из 54 выбранных ТЦ, кольцевые структуры в суточных полях молний были обнаружены в 39 ТЦ на стадии тайфунов или супер-тайфунов ($\sim 72\%$ всех тайфунов).

Для оценок характеристик ТЦ по полю ветра в работе были использованы ежедневные данные второго уровня о приводном ветре с пространственным разрешением 12,5 км, полученные по результатам сканирования морской поверхности скаттерометром ASCAT со спутников MetOp-A и MetOp-B [15]. Данные были получены через свободный ftp-доступ на сайте NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center [10]. Скорость ветра ASCAT дается в диапазоне 0 – 50 мс^{-1} ; погрешности оценок компонент скорости ветра составляют порядка 2 мс^{-1} при ветрах ниже 25 мс^{-1} и увеличиваются с возрастанием скорости ветра [15].

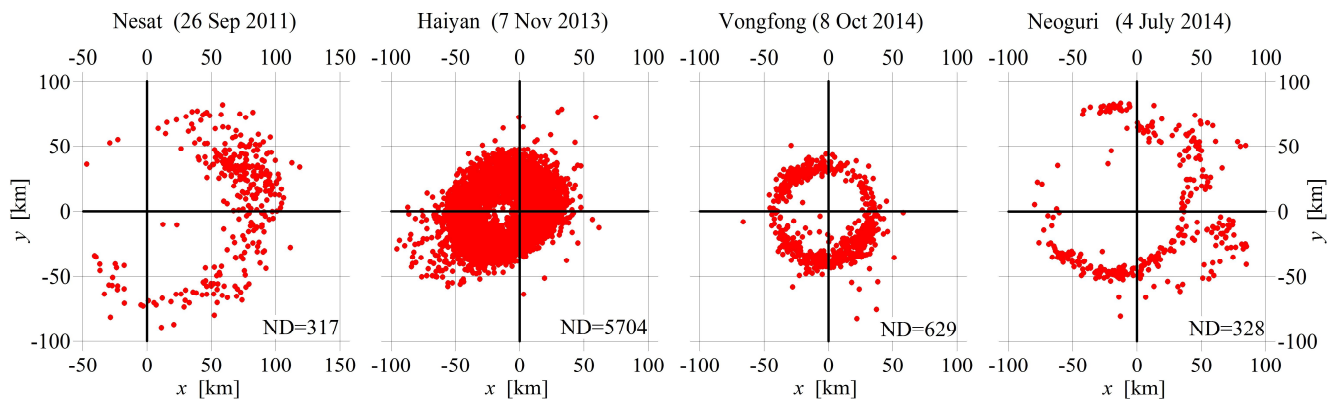


Рис. 1. Суточные поля молниевых разрядов в центральной области тайфунов, где ND – количество разрядов

МЕТОДЫ ОЦЕНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНОЙ СТЕНЫ ТАЙФУНОВ

Методы оценок характеристик облачной стены по данным WWLLN основаны на численном анализе распределения точек разрядов, выбранных за определенный интервал времени, в прямоугольной системе координат (x, y) с началом в центре тайфунов и детально описаны в [12]. Максимум плотности точек разрядов определяет положение облачной стены. Множество точек разрядов в кольцевых структурах аппроксимируется окружностями. Для этого была использована численная процедура минимизации суммарного расстояния точек разрядов до аппроксимирующей окружности по ее параметрам – координатам центра (x_c, y_c) и радиусу облачной стены RCW . Для сравнения с данными архивов JMA и JTWC и оценками, полученными по данным ASCAT, координаты центра (x_c, y_c) пересчитывались в географические координаты (λ_c, φ_c) . По характеристикам размаха радиального распределения точек разрядов оценивались радиусы ее внешней $ROUT$ и внутренней границ RIN и ширина облачной стены $D = ROUT - RIN$. На рис. 2 продемонстрированы результаты оценок характеристик облачной стены на примере супертайфуна Haiyan (2013) по двухчасовым выборкам данных WWLLN в 6-часовые сроки бест треков, т.е. в $(0000, 0600, 1200, 1800, 2400)$ UTC ± 1 час для 7 ноября 2013 г.

Оценки точности расчетов координат центра и всех радиусов проводились с помощью метода случайных выборок. Среднеквадратичные отклонения координат центра находились в пределах $(0,4-1,4)$ км, а радиусов $RIN, RCW, ROUT$ в пределах $0,3-1$ км [12]. Для сравнения укажем, что точность радарных оценок положения центра глаза $\sim 3,5$ км [5].

Положения центров облачной стены, радиусов облачной стены и ее внутренней границы, полученные по данным WWLLN, сравнивались с координатами тайфунов, радиусами максимального ветра и глаза, оцененным по данным бест треков и ASCAT. Для сравнения с характеристиками тайфунов по данным агентств JTWC и JMA молниевые композиции строились по двухчасовым выборкам в 6-часовые сроки бест треков, т.е. в $(0000, 0600, 1200, 1800)$ UTC ± 1 час (пример приведен на рис. 2). При этом минимальный объем выборки, необходимый для устойчивых оценок, составлял 20 разрядов. При этих условиях было получено 86 выборок данных WWLLN для 24 тайфунов.

Для сравнения параметров кольцевых структур по данным WWLLN и характеристик поля приводного ветра, полученным по данным ASCAT, опубликованными в [1] методами выборки молниевых разрядов формировались таким образом, чтобы их среднее время было в пределах ± 1 ч от времени данных ASCAT. Всего таким образом удалось получить 33 выборки данных WWLLN, квазисинхронных с данными ASCAT, для 19 тайфунов. Для оценок координат центров тайфунов и радиусов максимального ветра по приводному ветру ASCAT был использован корреляционный метод, в котором параметры аппроксимирующей окружности

находятся в процессе поиска максимума корреляции матрицы поля ветра ASCAT с матрицей идеального кольцевого распределения ветра [1]. В качестве оценки радиуса глаза тайфуна использовался радиус смены знака вихря скорости ветра ASCAT [1].

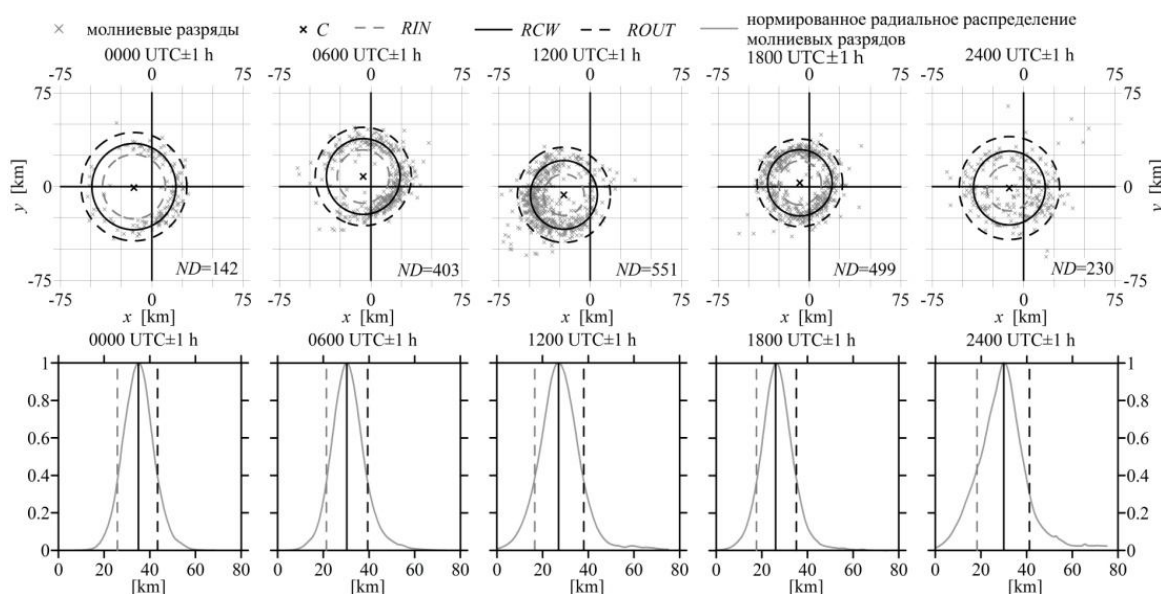


Рис. 2. Распределения молниевых разрядов в супертайфуне *Haiyan* 7 ноября 2013 г. (верхняя панель) и окружности с радиусами облачной стены и ее внутренней и внешней границ. Нижняя панель – сглаженные радиальные распределения разрядов

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Координаты ТЦ или тайфуна являются основными в практике их диагноза и прогноза, поэтому важно для оценки возможностей сети WWLLN дать сравнение координат центра облачной стены с координатами, которые даются в архивах JMA и JTWC. Расстояния между центрами облачной стены, по данным WWLLN, и центрами тайфунов, по данным архивов бест треков JMA, JTWC и рассчитанных по данным о приводном ветре скаттерометра ASCAT, в среднем составили 16 км, 17 км и 19 км соответственно.

Из важных результатов, имеющих практическое значение для мониторинга тайфунов, необходимо отметить тесную линейную связь между радиусом облачной стены RCW и радиусом максимального приводного ветра ASCAT RMW_{ASCAT} с высоким коэффициентом корреляции $\sim 0,87$. Радиусы RCW в выбранных тайфунах варьировали от 15 км до 100 км и в среднем составили 36 км. При этом радиусы RMW_{ASCAT} изменялись от 25 км до 98 км и в среднем составили 46 км. Для радиусов облачной стены и радиусов максимального ветра получено регрессионное соотношение $RMW_{ASCAT} = 2,4 + 1,4 \times RCW$ при среднем отклонении от регрессии ~ 7 км.

Еще одной важной характеристикой тайфуна является радиус его глаза, который в поле ветра характеризуется более низкими значениями скорости, а на спутниковых изображениях в видимом диапазоне выделяется как свободное от облачности пятно, а в инфракрасном диапазоне – как пятно повышенной температуры. Радиусы внутренней границы облачной стены тайфунов RIN , полученные по данным WWLLN, изменялись в диапазоне от 1,2 км до 44 км и в среднем составили 16 км. Радиусы глаза ТЦ, оцененные по данным ASCAT ($REYE_{ASCAT}$) в основном меньше RIN и варьировали в пределах 6–19 км и в среднем составили 13 км. Оценки RIN и $REYE_{ASCAT}$ демонстрируют линейную связь с коэффициентом корреляции 0,84 и могут быть связаны соотношением $REYE_{ASCAT} = 6,15 + 0,4 \times RIN$ и средней разностью между ними ~ 6 км.

Характеристики облачной стены тайфунов сравнивались с радиусами максимального ветра и глаза в архивах JMA и JTWC, которые используют методы оценок характеристик тайфунов с помощью анализа облачности на спутниковых снимках (в видимом и инфракрасном диапазонах), отражающих поля верхней границы облачности. Значения радиусов облачной стены RCW , вычисленных по данным WWLLN на время данных бест треков, варьировались от 14 км до 82 км и в среднем составили 34 км. Радиусы максимального ветра в ТЦ по данным бест треков JTWC (RMW_{JTWC}) были меньше RCW и изменялись в диапазоне от 13 до 57 км и в среднем составили 27 км. В среднем различие между RCW и RMW_{JTWC} составило ~15 км, что в два раза больше среднего модуля разности между RCW и RMW_{ASCAT} . Радиусы внутренней границы облачной стены RIN находились в диапазоне 4–64 км и в среднем составили 18 км. Величины $REYE_{JTWC}$ были значительно меньше и изменялись в диапазоне от 5 до 28 км при среднем значении 16 км. Связь между радиусами по данным WWLLN и бест треков JTWC слабая (коэффициенты корреляции составили 0,26 и 0,34), что может быть обусловлено спецификой методики оценок по спутниковым изображениям, используемой агентством JTWC [14]. Это подтверждается группировкой радиусов RMW_{JTWC} и $REYE_{JTWC}$ околосекретных значений, следующих с интервалами от ~5 км до ~10 км на гистограммах оценок, построенных по многолетним выборкам этих радиусов в архивах JTWC.

Данные WWLLN позволяют оценить еще два параметра облачной стены – радиус ее внешней границы $ROUT$ и ее ширину D , которые могут быть важными характеристиками тайфунов и ураганов, но они не могут быть оценены традиционными спутниковыми методами. Всего было получено 86 оценок ширины облачной стены 24 ТЦ за период 2011–2015 гг., которые варьировали от 15 до 69 км и в среднем составили 30 км. Полученные оценки согласуются с размерами областей максимальной отражаемости на радарных изображениях глаза ураганов и тайфунов [13].

В случае достаточно высокой и непрерывной молниевой активности в центральной области тайфуна по данным WWLLN можно проводить оценки в скользящем окне с дискретностью 15–30 мин, сравнимой с дискретностью получения изображений ТЦ с геостационарных спутников. При этом последовательные оценки положения тайфуна позволяют рассчитать его скорость и направление перемещения. Пример таких расчетов по данным одночасовых выборок со сдвигом, равным получасу для супертайфуна Haiyan в день его максимального развития (7 ноября 2013 г.), приведен на рис. 3. Было получено 50 оценок характеристик по данным 50 выборок с объемами от 23 до 678 разрядов. На рис. 3,а показан участок траектории центра облачной стены C , а на рис. 3,б показаны соответствующие радиусы RIN , RCW и $ROUT$. Барами показаны среднеквадратичные отклонения наших оценок на сроки бест треков, полученных в результате статистических испытаний. Для сравнения на рис. 3 показана траектория центра тайфуна C_{JMA} , полученная по данным бест треков JMA с помощью сплайновой интерполяции на среднее время выборок WWLLN. Также показаны 6-часовые координаты центра C_{JTWC} , радиусы глаза $REYE_{JTWC}$ и максимального ветра RMW_{JTWC} тайфуна.

Представленные результаты демонстрируют достоинства представленных методов оценки геометрические характеристики облачной стены по данным глобальной сети WWLLN с достаточной точностью, так как точки разрядов, регистрируемых сетями локализации молний, прямо связаны с положением мощных кучевых облаков в стене глаза. При этом точность оценок может быть выше точности оценок по спутниковым изображениям, достигая точности радиолокационных методов, и ее можно контролировать методами случайных выборок. Эти методы позволяют оценивать радиус внешней границы облачной стены и ширину кольца облаков, образующих стену глаза, что не дают традиционные спутниковые методы. Однако перечисленные достоинства методов оценки характеристик облачной стены по данным WWLLN (или других сетей) могут быть реализованы только при достаточно большой плотности молний в центральной области зрелых ТЦ на стадии шторма, тайфуна и урагана. Но не во всех ТЦ складываются условия, при которых образуются кольцевые молниевые структуры и можно применять описанные методы. Как показала наша статистика, только в ~72%

тайфунов в поле молний наблюдались кольцевые структуры в облачной стене. Отсутствие кольцевых молниевых структур может быть обусловлено и недостаточно высокой эффективностью регистрации молний сетью WWLLN, которая зависит от многих факторов: сложившейся конфигурации станций на момент молниевых разряда, его мощности (тока), времени суток, географических условий, состояния ионосферы.

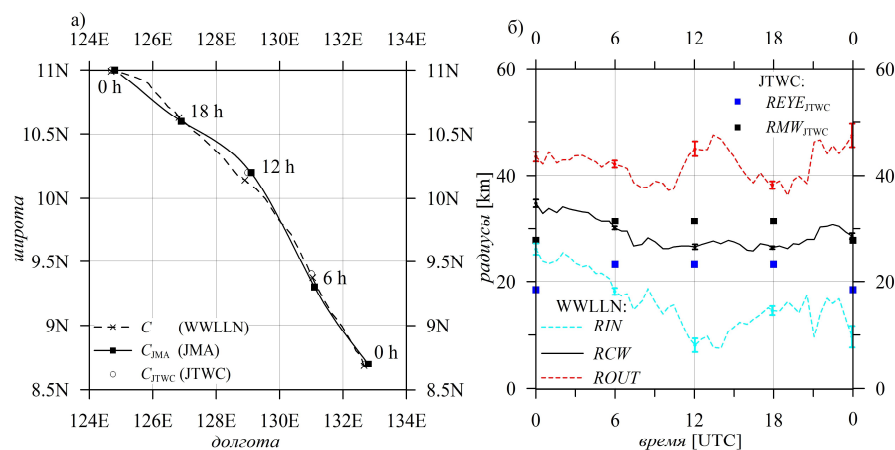


Рис.3. Траектория (а) и изменчивость характеристик облачной стены (б) супертайфуна Haiyan 7 ноября 2013 г. [12]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты указывают на возможность использовать данные глобальной сети локализации молний WWLLN для определения в реальном масштабе времени характеристик тайфунов – координат центра, радиуса максимального ветра и радиуса глаза, ширины облачной стены. Показано, что точность оценок координат центра тайфунов и радиусов облачной стены по данным глобальной сети WWLLN может быть выше оценок по спутниковым изображениям, достигая точности радиолокационных методов. В случае высокой плотности и частоты данных WWLLN можно проводить оценки характеристик облачной стены тайфуна в скользящем окне длительностью 15–30 мин с дискретностью, с которой получают изображения ТЦ с геостационарных спутников. Описанные методы анализа данных сети WWLLN могут применяться к данным других наземных сетей локализации молний и позволяют использовать такие сети в оперативной практике мониторинга ураганов и тайфунов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН, тема № 0271-2019-0011 и при поддержке РФФИ (проект № 18-05-80011).

Список используемых источников

1. Пермяков М.С., Клещёва Т.И., Поталова Е.Ю. Оценки характеристик облачной стены глаза тайфунов по данным скаттерометров ASCAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, №7. – С. 249–258. – Doi:10.21046/2070-7401-2018-15-7-249-258.
2. Поля молниевых разрядов в тайфунах / М.С. Пермяков, Е.Ю. Поталова, А.Н. Дрога, Б.М. Шевцов // Исследование Земли из космоса. – 2017. – №4. – С. 59–67.
3. Пермяков М.С., Поталова Е.Ю., Клещёва Т.И. Грозовая активность в Приморском крае // Метеорология и гидрология. – 2019. – №12. – С. 43–52.

4. Грозовая активность и структура тропических циклонов / М.С. Пермяков, Е.Ю. Потапова, Б.М. Шевцов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, №7. – С. 638–643.
5. *Chang P.-L., Jou B. J.-D., Zhang J.* An Algorithm for Tracking Eyes of Tropical Cyclone // Weather Forecasting. – 2009. – Vol. 24. – P. 245–261.
6. WWLLN Absolute Detection Efficiencies and the Global Lightning Source Function / M.L. Hutchins, R. H. Holzworth, C. J. Rodgers et al. – EGU General Assembly, 2012. – Vienna, Austria. – URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA.1412917H> (дата обращения: 03.03.2020).
7. Japan Meteorology Agency, JMA. – URL: <http://www.jma.go.jp> (дата обращения: 03.03.2020).
8. Joint Typhoon Warning Center, JTWC. – URL: <http://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html/> (дата обращения: 03.03.2020).
9. Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance / J.P. Kossin, J.A. Knaff, H.I. Berger et al. // Weather Forecasting. – 2007. – Vol. 22. – P. 89–101.
10. NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center. – URL: <https://podaac.jpl.nasa.gov/> (дата обращения: 03.03.2020).
11. *Olander T.L., Velden C.S.* The advanced Dvorak technique: continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery // Weather Forecasting. – 2007. – Vol. 22. – P. 287–298.
12. Characteristics of typhoon eyewalls according to World Wide Lightning Location Network data / M. Permyakov, T. Kleshcheva, E. Potalova, R.H. Holzworth // Monthly Weather Review. – 2019. – Vol.147, is.11. – P. 4027–4043.
13. *Squires K., Businger S.* The morphology of eyewall lightning outbreaks in two category 5 hurricanes // Monthly Weather Review. – 2008. – Vol.136. – P. 1706–1724.
14. *Velden C. and Coauthors* The Dvorak Tropical Cyclone Intensity Estimation Technique: A Satellite-Based Method that Has Endured for over 30 Years // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2006. – Vol. 87. – P. 1195–1210.
15. *Verhoef A.H. and Stoffelen A.* Wind Product User Manual version 1.15 SAF/OSI/CDOP/KNMI/TEC/MA/126, Eumetsat. – URL: http://projects.knmi.nl/publications/fulltexts/ss3_pm_ascat_1.15.pdf (дата обращения: 03.03.2020).
16. *Wimmers A. J., Velden C. S.* Objectively Determining the Rotational Center of Tropical Cyclones in passive microwave satellite imagery // Applied Meteorology and Climatology. – 2010. – Vol.49. – P. 2013–2034.
17. Worldwide Lightning Location Network, WWLLN. – URL: [http:// www.wwlln.net](http://www.wwlln.net) (дата обращения: 03.03.2020).

Ю.А. Копытенко*,
доктор физико-математических наук;
О.В. Латышева*;
А.А. Петрова*,

кандидат физико-математических наук

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН, г. Санкт-Петербург.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ЭВОЛЮЦИЮ ТОЛЩИНЫ И КРОМКИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИКИ

В статье рассматриваются результаты изучения влияния глубинных разломов земной коры на таяние ледяного покрова Северного Ледовитого океана. Были изучены спутниковые наблюдения за состоянием ледяного покрова, проведена комплексная интерпретация гравитационных аномалий, магнитных аномалий, сейсмических и сейсмологических данных. Показано, что флюидоподводящие каналы вносят значительный вклад в локализацию сезонного таяния многолетних льдов и конфигурацию границ старого и однолетнего льда.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения ледяного покрова, толщина льда, флюидоподводящий канал.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы являются исследование особенностей флюидной системы земной коры Северного Ледовитого океана (СЛО) и выявление выходов флюидоподводящих каналов к поверхности дна. Спутниковые наблюдения в Арктике позволили оценить состояние ледяного покрова, отследить динамику границ разновозрастного льда, межгодовую и сезонную трансформацию ареалов протаивания многолетнего морского льда [3–9, 11–12]. Для оценки влияния глубины заложения разломов на характер зон разрушения многолетнего льда проведен анализ ареалов таяния, приуроченных к выходам термофлюидных каналов. Выявление местоположения выходов каналов позволит прогнозировать локализацию зон изменчивости толщины многолетнего льда и скорость разрушения кромки ледового покрова.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНДОГЕННОГО МЕХАНИЗМА ТАЯНИЯ ЛЬДА АРКТИКИ

Проведено исследование особенностей глубинного строения земной коры СЛО, флюидной системы и глубинных разломов. Флюидопроводящие каналы представляют собой ослабленные зоны с низкой намагниченностью и пониженными плотностными свойствами [1, 2, 10]. Пути миграции флюидизированных потоков прослеживаются на плотностных и магнитных разрезах в виде сквозных и ветвистых треков, секущих разные слои земной коры (рис. 1, 2). Исследование плотностных и магнитных свойств земной коры осуществлено методом спектрально-пространственного анализа (СПАН), позволяющим конвертировать спектрально-пространственное представление аномального поля в глубинный разрез [2]. Сопоставление плотностного разреза с сейсмическими разрезами по линиям профилей показало, что скоростные характеристики хорошо согласуются с полученной картиной распределения плотностных образований. Очаги землетрясений тяготеют к контактам пород разной плотности на кровле, подошве и на латеральных границах плотностных неоднородностей.

На основе анализа плотностных и магнитных свойств земной коры СЛО были намечены возможные пути восхождения термофлюидных потоков, что позволило выявить местоположение выходов флюида по разломным зонам к поверхности дна.

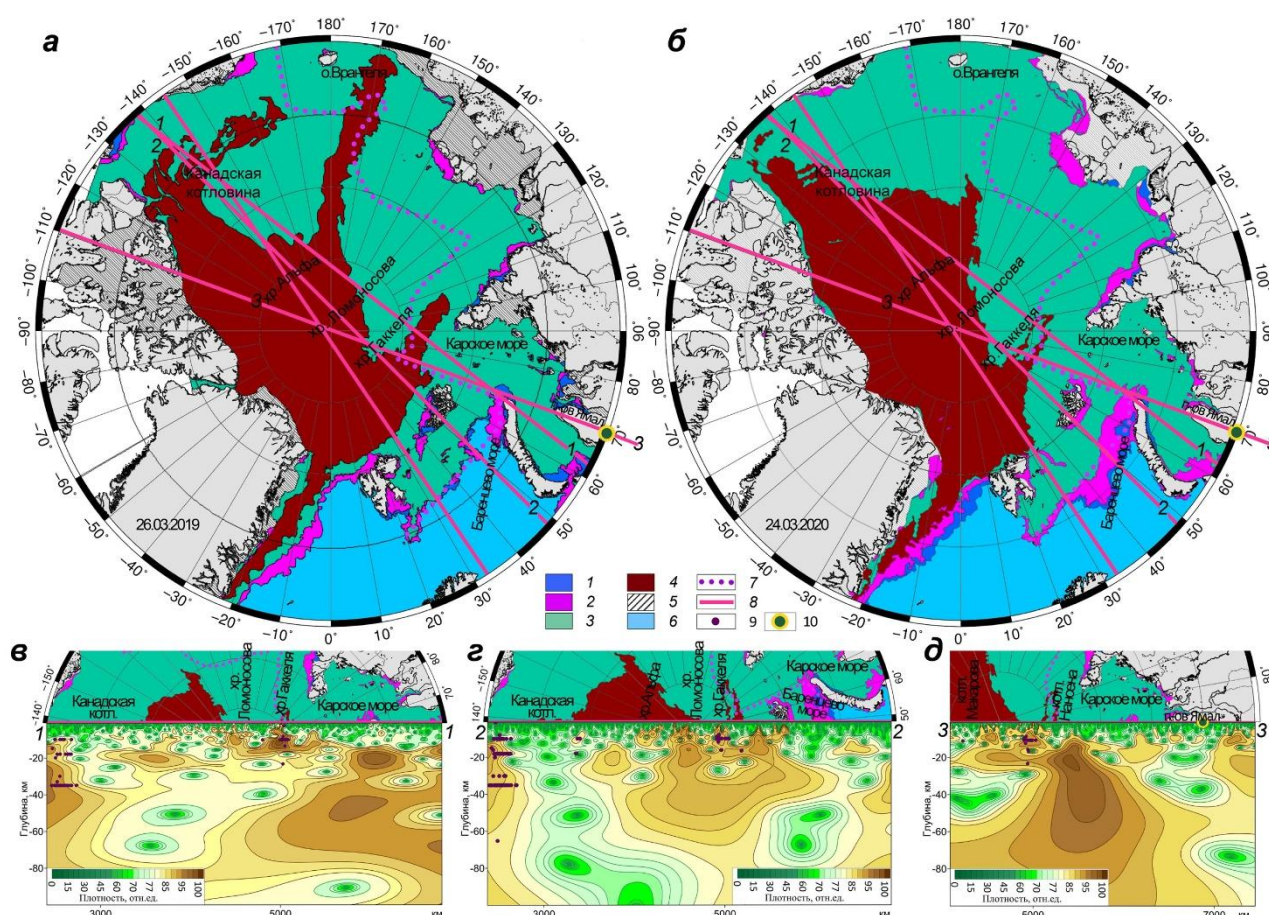


Рис. 1. Ледяной покров в марте 2019 года (а), 2020 года [12] (б).

Глубинные плотностные разрезы: 1-1 (в), 2-2 (г), 3-3 (д). На рисунке обозначены: 1 – нилас; 2 – молодой лед; 3 – однолетний лед (30–200 см); 4 – старый лед; 5 – припай; 6 – без льда; 7 – северная граница СМП; 8 – положение разрезов; 9 – очаги землетрясений; 10 – Ямальский кратер

Влияние флюидных потоков разрывных нарушений земной коры на состояние морского ледяного покрова, конфигурацию границ льда и характер распределения снежиц многолетнего льда рассмотрено на примере спутникового мониторинга ледовых условий за период 2008–2020 годов [3–8, 11–12]. Визуализация разрезов на основе комплексной интерпретации аномалий силы тяжести, магнитных аномалий и сейсмологических данных показала эффективность воздействия флюидоподводящих каналов на формирование кромки многолетнего льда и границ старого и однолетнего льда (рис. 1 и 2). На характер зон активного таяния льда влияет глубина залегания флюидных систем, питающих термофлюидные потоки. Максимальный эффект таяния ледяного покрова наблюдается под воздействием теплового потока при восходящей миграции флюидов по вертикальным и субвертикальным разломам.

На разрезах выделяются глубинные разломные зоны пониженной плотности, приуроченные к участкам годичного изменения границ старого и однолетнего льда. На разрезе 2-2 разрушение кромки многолетнего льда в Канадской котловине приурочено к мощной ослабленной зоне разрывных нарушений земной коры и мантии, прослеживающейся до глубины более 80 км (рис. 1, 2).

Вблизи границы Северного морского пути (СМП) в восточной части Баренцева моря разломная зона четко прослеживается до 25 км. Возможно, она находится под воздействием

флюидной системы, проявляющейся в виде разуплотненных линз на глубине 50–70 км (рис. 1,з). Этот флюидоподводящий вертикальный канал контролировал кромку ледяного покрова при формировании сентябрьского минимума льда 2019 года [11–12].

Наиболее наглядно разрушение кромки многолетнего льда под влиянием флюидных каналов разломных зон проявилось на ледяном покрове самого малого развития зимой 2007–2008 годов (рис. 2). При пересечении Канадской котловины на плотностном разрезе *AB* выделяется мощная глубинная зона нарушений пониженной плотности, выходящая из мантии и пересекающая земную кору (рис. 2,а и з).

Листрический разлом этой же глубинной зоны нарушений выходит к границе СМП между Чукотским поднятием и о. Врангеля.

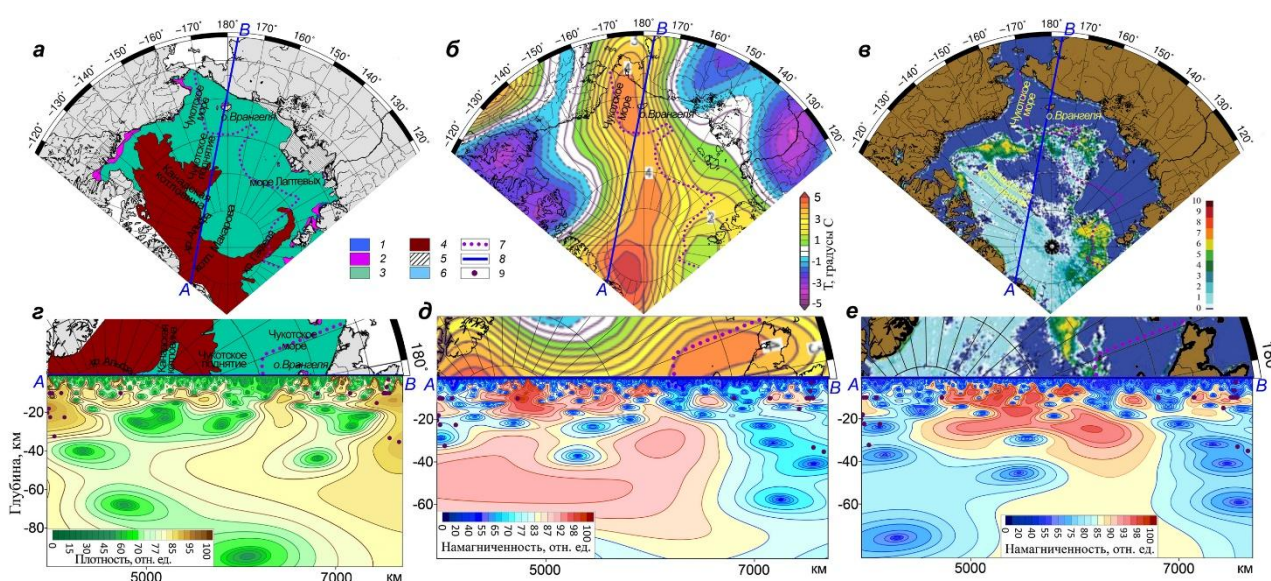


Рис. 2. Ледяной покров малого развития (20.02.2008) [12] (а); температура (12.2019) [9] (б); относительная площадь снежниц (15.08.2014) [3–6] (в). Глубинные разрезы *AB*: плотностной (г); магнитные по аномалиям МПЗ: модуля (д); горизонтальной компоненты (е) [см. условные обозначения на рис. 1]

В Чукотском море с южной стороны о. Врангеля к поверхности дна подходит другой вертикальный разлом, прослеживающийся по плотностному разрезу с 50 км. На карте температур Арктики [9] о. Врангеля расположен вблизи температурного максимума, приходящегося на Чукотское море (рис. 2,б и д). Благодаря пониженным магнитным свойствам пород в зоне нарушений, повышенный тепловой поток четко прослеживается на магнитных разрезах, построенных по аномалиям модуля (рис. 2,д) и горизонтальной компоненте вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ) (рис. 2,е). Именно этот термофлюидный поток в осенний период разрушает кромку однолетнего льда, полностью освобождая СМП для судоходства в Чукотском море (рис. 2,в и е).

По результатам анализа толщины многолетнего льда Арктики выявлено, что определяющую роль в процессе протаивания льда с образованием разводий и снежниц играют вертикальные разломные зоны глубинного заложения, которые вносят значительный вклад в механизм сезонного таяния многолетнего льда и локализации снежниц (рис. 2,в и е). Количество снежниц служит одним из индикаторов изменчивости состояния морского льда [3–5]. Сокращение многолетнего льда и всё усиливающееся преобладание относительно тонких однолетних льдов являются одними из самых значительных изменений, произошедших в Арктике за последние десятилетия. В результате этих процессов произошло уменьшение объема льда в Арктике, что привело к усилению дрейфа ледового покрова СЛО [3, 6–8].

Флюидоподводящие каналы, пронизывающие земную кору, могут быть причиной возникновения опасных природных явлений в зоне многолетней мерзлоты, представляя опасность для мореплавания и эксплуатации нефтегазодобывающих платформ. Эти природные явления происходят в результате внезапного высвобождения метана из подводной мерзлоты в акватории и при таянии многолетней мерзлоты на территории сухопутной Арктической зоны Российской Федерации.

Опасное криогенное явление – ямальский кратер – в 2014 году зафиксировано на п-ве Ямал. Он представляет собой шахту глубиной 33 м и диаметром около 40 м со следами интенсивного выброса пород и льда. Кратер приурочен к мощной вертикальной разломной зоне, прослеживающейся по плотностному разрезу 3-3 до глубины 45 км (см. рис. 1, д). В мантии на глубине около 70 км расположена разуплотненная линза, пульсация которой может служить спусковым механизмом внезапного возникновения термокарстов. Активизация этих процессов угрожает строящейся и уже существующей газодобывающей и транспортной инфраструктуре.

Разрезы 1-1 и 2-2 (см. рис. 1) пересекают зоны возможных возникновения опасных природных явлений в Канадской котловине и Баренцевом море в районе развития газогидратов Восточно-Баренцевоморской нефтегазоносной провинции. Разрез *AB* (см. рис. 2) по магнитным и плотностным данным выявляет три выхода флюидов, которые, весьма вероятно, могут создать опасные природные явления: в Канадской котловине, у северной границы СМП и в окрестности о. Врангеля. Учитывая глубину и мощность вертикальных разломных зон, наиболее сильный эффект можно ожидать в Канадской котловине.

Для оценки безопасности мореплавания по результатам комплексной интерпретации магнитных аномалий, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных исследована возможность выявления выходов флюидовыводящих разломов глубинного заложения вдоль трасс СМП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе спутниковых данных о ледовых условиях и комплексной интерпретации аномалий силы тяжести, магнитных аномалий и сейсмологических данных показано, что флюидоподводящие каналы способствуют формированию кромки многолетнего льда и существенно влияют на конфигурацию границы старого и однолетнего льда.

2. Результаты анализа годовых и сезонных изменений толщины многолетнего льда Арктики в период с 2008 по 2020 год показали, что определяющую роль в процессе протаивания льда с образованием разводий и снежниц играют вертикальные разломные зоны глубинного заложения. Они вносят значительный вклад в механизм сезонного таяния многолетнего льда и локализации снежниц.

3. Изучен механизм влияния глубинных разломов СЛО на скорость таяния морского льда, уменьшения толщины и на эволюцию кромки ледяного покрова. С учетом проведенного анализа возможен прогноз локализации зон размыва и скорости разрушения многолетнего льда для обеспечения безопасного мореплавания и освоения морских месторождений полезных ископаемых Арктики.

4. Для оценки безопасности мореплавания по результатам комплексной интерпретации магнитных аномалий, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных исследована возможность выявления выходов флюидовыводящих разломов глубинного заложения вдоль трасс СМП.

Список используемых источников

1. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Компоненты морских линейных магнитных аномалий Мирового океана. Ч. 1. Северная Атлантика // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика: журн.* – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 34–41.
2. Петрова А.А., Копытенко Ю.А. Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минералогической зоны Северного Забайкалья // *Вестник КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле.* – 2019. – Вып. 41, № 1. – С. 37–53.
3. Ретина И.А., Тихонов В.В. Снежницы на поверхности льда в летний период и их связь с климатическими изменениями в Арктике // *Российская Арктика.* – 2018. – №2. – С. 15–30.
4. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии / В.В. Тихонов, М.Д. Раев, Е.А. Шарков и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2015. – Т. 12, № 5. – С. 150–169.
5. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов: обзор / В.В. Тихонов, М.Д. Раев, Е.А. Шарков и др. // *Исследование Земли из космоса.* – 2016. – № 4. – С. 65–84.
6. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2017. – Т.14, № 6. – С. 28–41.
7. Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // *Российская Арктика.* – 2019. – № 7. – С. 28–40.
8. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume / S.W. Laxon et al. // *Geophysical Research.* – 2013. – Letters 40. – P. 732–737.
9. NSIDC courtesy NOAA Earth System Research Laboratory Physical Sciences Division. – URL: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2020/01/> (дата обращения: 5.02.2020).
10. Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. and Petrishchev M.S. Deep Fluid Systems of Fennoscandia Greenstone Belts // *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields.* – 2019. – P. 239–247. – Doi: [org/10.1007/978-3-319-97670-9_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28).
11. *Rapid ICE growth* Arctic sea ice reaches the largest early February ice area in the past 11 years! It even exceeds the 2001–2010 average size» SevereWeatherEurope (accessed: 14.04.2020).
12. World Data Center Sea Ice file server. Available at. – URL: <http://wdc.aari.ru> (accessed: 09.04.2020).

О.Ю. Корнеев,

заслуженный работник высшей школы РФ, доктор техн. наук, профессор

Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Санкт-Петербург.

СИНОПТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ДИАГНОЗ ПРИЗЕМНОГО БАРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НАД АКВАТОРИЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

На основе выполненной типизации приземного барического поля (ПБП) над Северной полярной областью Земли в 1948–2010 гг. с использованием метода естественных ортогональных функций и разработки физико-статистических моделей восстановления ПБП над Северным Ледовитым океаном (СЛО) по ПБП над приарктической сушей для каждого типа удалось повысить точность восстановления ПБП над СЛО в 2-3 раза для различного варианта наличия дрейфующих ГМ-буев в СЛО.

Ключевые слова: гидрометеорологическое обеспечение, приземное барическое поле, естественные ортогональные функции, физико-статистические модели.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи гидрометеорологического обеспечения (ГМО) над акваториями морей и океанов существенно усложняются, когда по каким-либо причинам отсутствует гидрометеорологическая информация с территории отдельных прибрежных государств. Сложности ГМО объясняются прежде всего тем, что из-за малого числа гидрометеорологических наблюдений с акватории океанов крайне трудно составить суждение (диагноз) о реальной форме (структуре) приземного барического поля, определяющего такие важные для мореплавания гидрометеорологические поля под ним, как поля приводного ветра, видимости, морского волнения, дрейфовых течений, динамики ледяного покрова СЛО и др.

Общеизвестно, что любые гидродинамические и физико-статистические методы прогноза погоды требуют для своей реализации исходное диагностическое поле. При этом чем грубее, в смысле точности, определено (восстановлено) исходное поле, тем менее точным будет и составленный прогноз.

Существующая в настоящее время практика объективного анализа в метеорологии ориентирована на использование месячных норм в узлах регулярной сетки и полугодовых или месячных автокорреляционных пространственных функций, что является оправданным при большой плотности метеорологических наблюдений на суше. При объективном анализе барического поля над акваториями океанов ситуация существенно изменяется из-за малого числа фактических наблюдений. К тому же возникают ситуации, когда расстояние от точки наблюдений до узла регулярной сетки становится больше, чем радиус используемой функции. В таких случаях значение атмосферного давления в узле принимается равным его среднемесячному значению (норме) для данной точки.

Синоптический опыт показывает, что в течение месяца в районе одной и той же точки наблюдений существуют периоды как циклонической, так и антициклонической завихренности воздушных масс. Именно эти периоды определяют истинные границы пространственно-временной квазистационарности (анизотропности) атмосферных процессов, при осреднении которых в жестких календарных границах (дня, недели, месяца, года и т.д.) природная изменчивость затушевывается, а календарная норма объединяет в себе два диаметрально противоположных атмосферных процесса. Вполне очевидно, что при объективном анализе барического поля в конкретный день месяца было бы целесообразно использовать в узле

среднее значение, являющееся не месячной нормой, а нормой атмосферного давления наблюдающегося типа завихренности атмосферных процессов в данном районе.

Для проверки выдвинутого предположения была разработана помесечная количественная типизация приземных барических полей в Арктике выше 55° с.ш. с использованием математического аппарата естественных ортогональных функций. При этом с учетом того, что нам надо знать, какой тип атмосферных процессов преобладает над СЛО, типизировались ПБП над приарктической сушей, которые гораздо более точно можно построить по наземным метеорологическим станциям. С учетом наличия над Северным приполюсным районом циркулярного циклонического вихря вполне очевидно, что тип атмосферного процесса над акваторией СЛО будет зависеть от ПБП над приарктической сушей. Поэтому дальнейшим шагом в проверке выдвинутого предположения стало установление статистической связи между ПБП над сушей и СЛО для каждого выделенного типа.

Типизация тропосферных процессов для теплого и холодного полугодий в Арктике А.А. Дмитриева из ААНИИ [2] подтверждает наличие связи атмосферных процессов над сушей и СЛО, но она была составлена «вручную» на основе визуального анализа приземных синоптических карт и поэтому не имеет статистических характеристик в узлах регулярной сетки, что делает невозможным ее использование при автоматическом цифровом диагностировании.

Процедура создания помесечных типизаций заключалась в обработке Банка данных NCEP/NCAR срочных приземных барических полей (четыре раза в сутки) выше 55° с.ш. за 1948–2010 гг. Для каждого месяца были выделены массивы полей ПБП для суши и океана. Далее для общего массива месяца строились пространственные автокорреляционные матрицы, определялись собственные значения матриц (табл. 1) и по ним вычислялись естественные ортогональные функции (ЕОФ) для всего месячного поля.

Таблица 1

Собственные значения (%) месячных автокорреляционных матриц над Арктикой

п/п	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	год
1	38,207	35,470	32,525	32,641	31,983	27,313	22,478	26,276	28,092	29,758	32,995	33,920	32,619
2	18,805	20,251	21,089	17,713	19,110	18,924	18,417	18,969	17,253	18,098	19,702	19,659	20,425
3	11,866	13,889	12,759	12,833	12,544	13,672	15,256	12,304	12,346	13,146	13,126	12,409	13,148
4	10,058	9,093	11,110	9,964	9,272	9,658	11,265	10,235	10,477	9,873	9,390	10,099	9,140
5	4,729	5,172	5,839	6,630	5,512	7,327	7,593	6,913	8,324	6,860	5,994	5,275	5,687
6	3,949	4,276	4,191	4,467	4,284	5,336	6,098	5,861	4,834	4,990	4,509	4,496	4,098
Сумма	87,6	88,2	87,5	84,2	82,7	82,2	81,1	80,6	81,3	82,7	85,7	85,9	85,1

Как видно из представленной таблицы, матрицы получились быстро сходящимися и уже первые шесть компонент описывают от 80 до 88% общей изменчивости (дисперсии) поля. Данный факт позволил представлять срочные поля коэффициентами разложения по 6–10 ЕОФ для различных месяцев. В результате разложения каждый срок ПБП представлялся вектором коэффициентов от 6 до 10 значений, которые и были подвергнуты количественной типизации методом К-средних. Результаты типизации представлены в табл. 2. Вышеперечисленная процедура была проведена для отдельных месячных типовых массивов полей суши и над СЛО, после чего были построены синоптико-статистические модели восстановления ПБП над СЛО в типе по данным над сушей. Точность восстановления оценивалась относительной ошибкой, являющейся традиционно отношением дисперсии СММ к дисперсии месяца. Результаты моделирования представлены также в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты типизации атмосферных процессов в Арктике
и моделирования ПБП над СЛО**

Месяц	СКО, гПа	Кол-во типов	СКО типа, гПа	Относит. ошибка типа	СКО ССМ, гПа	Относит. ошибка ССМ
1	14,4	19	8,8	0,61	7,27	0,26
2	14,1	22	8,58	0,61	7,27	0,26
3	13	25	7,97	0,61	6,96	0,29
4	10	15	7,8	0,78	6,3	0,40
5	9,1	23	6,38	0,70	5,4	0,35
6	8,1	25	5,45	0,67	5,08	0,40
7	7,5	32	5,27	0,70	4,88	0,42
8	7,9	15	5,9	0,75	5,06	0,53
9	9,5	20	7,27	0,77	6,18	0,42
10	11,6	20	7,87	0,68	6,88	0,35
11	13	21	8,05	0,62	7,03	0,40
12	13,6	15	8,95	0,66	7,06	0,27
Среднее	10,98		7,36	0,68	6,28	0,36

По результатам, приведенным в таблице, можно сделать вывод, что средняя относительная ошибка типизации [отношение среднеквадратических ошибок (СКО) типа к СКО месяца] составляет 0,68, что соответствует уточнению значений месячной нормы на 32%, а это в случае отсутствия данных буев в СЛО улучшит соответствующим образом точность объективного анализа. Средняя точность восстановления ПБП над СЛО по данным типовых ССМ оценена относительной ошибкой 0,36, что улучшает климатическую (месячную) точность на 64%.

Сущность предлагаемой модификации объективного анализа заключается в использовании при решении системы линейных уравнений не среднегодовых или среднемесячных значений атмосферного давления в узлах регулярной сетки, а типовых, а также в использовании не полугодовой корреляционной функции, используемой в NCER ($R = e^{-d^2/L^2}$, где d – расстояние, км, между буюм и узлом расчета, $L = 900$ км – масштаб), а соответствующих значений типовой пространственной корреляционной матрицы.

Для демонстрации возможных различий между значениями полугодовой и типовой автокорреляционных функций, а также демонстрации неоднородности структуры ПБП были определены их значения для одинаковых расстояний, выраженных в градусах меридиана (табл. 3). Для корреляционной матрицы конкретного типа ПБП в феврале значения функции вычислены для направлений от Северного полюса до широты 50° вдоль меридианов 0° , 90° и 270° .

Различия даже для первого шага ($2,5^\circ = 150$ миль) уже существенны. Кроме того, если полугодовая функция предполагает отсутствие связи между точками, удаленными более чем на 1000 км, то для типовых функций и, соответственно, матриц наблюдается наличие связи даже при расстояниях более 3000 км (например, между Северным полюсом и районом озера Байкал). Такие существенные различия позволяют предположить, что для восстановления значений ПБП над СЛО можно использовать данные не только береговых и островных метеостанций, как это делается в существующем методе ОИ, но и данные метеостанций, расположенных в центре и на южной окраине России.

Таблица 3

**Различия полугодовой автокорреляционной функции
и типовой корреляционной матрицы**

Шаг, °№	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	40,0
R	0,91	0,68	0,42	0,22	0,09	0,03	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
$R(0^\circ)$	0,88	0,67	0,42	0,20	0,07	0,02	0,01	-0,03	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,05	-0,02	-0,02
$R(90^\circ)$	0,91	0,73	0,49	0,25	0,03	-0,11	-0,21	-0,26	-0,27	-0,26	-0,22	-0,18	-0,14	-0,12	-0,10	-0,08
$R(270^\circ)$	0,68	0,14	-0,18	-0,31	-0,28	-0,19	-0,11	-0,10	-0,13	-0,18	-0,20	-0,23	-0,22	-0,18	-0,12	-0,07

Для проверки эффективности предполагаемого модифицированного метода объективного анализа (МОА) были вычислены значения приземного давления для координат автоматического буя № 9360 в течение февраля 1996 г., при этом использовались существующий и предлагаемый методы ОА. Результаты сравнения фактически измеренных и вычисленных значений приведены в табл. 4.

При расчетах использовались три ситуации: первая – все существующие буи на данную дату в СЛЮ; вторая – все буи, за исключением тех, что находились в радиусе 800 км от точки расчета; третья – без учета данных от буюв, а использовались только данные с материка.

Таблица 4

**Результаты восстановления значений приземного давления в местоположении буя
№ 9360 модифицированным (1) и традиционным (2) методами ОА в феврале 1996 г.**

Дата февраля	P_0 , гПа буя	P_t , гПа типа	P_m , гПа месяца	№ типа	Отклонение ($P_0 - P_{comp}$), гПа						R_{\min} типа	R_{filter} типа
					Все буи, ближайший – 330 км		Все буи, ближайший – 800 км		Без буев			
					1	2	1	2	1	2		
Среднее абсолютное значение					2,1	5,2	5,2	12,0	5,8	15,2	0,06	0,69

При решении системы линейных уравнений методом ОА использовался учет всех значений типовой корреляционной матрицы, превышающих значение R_{min} , которое оказалось равным в среднем 0,05–0,10. Для повышения устойчивости решения систем уравнений было обосновано значение фильтрации (R_{filter}) коэффициентов корреляции типовой матрицы. Из типовой корреляционной матрицы выбирались значения ниже R_{filter} . Результаты исследований показали, что значение R_{filter} оказалось равным в среднем 0,65–0,70. После анализа данных, представленных в табл. 4, можно сказать, что полученные параметры (R_{min} и R_{filter}) при реализации предлагаемого МОА достаточно устойчивы для различных типов, что свидетельствует об общей устойчивости предлагаемого подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты сравнения существующего и предлагаемого методов объективного анализа для различных ситуаций наличия и расположения гидрометеорологических дрейфующих буюв в СЛЮ показывают, что предлагаемая модификация повышает точность восстановления значений приземного давления по сравнению с существующим методом более чем в два раза для всех анализируемых ситуаций.

Список используемых источников

1. Гандин Л.С., Коган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 359 с.
2. Дмитриев А.А. Изменчивость атмосферных процессов Арктики и ее учет в долгосрочных прогнозах погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1994. – 207 с.
3. Корнеев О.Ю. Синоптико-статистический диагноз и прогноз приземного барического поля над водными акваториями Северной полярной области Земли в условиях ограниченности поступления исходной гидрометеорологической информации. – Л.: ГУНИО МО РФ, 1989. – 98 с.
4. Korneev O. Modified objective analysis method (OA) of SLP above the Arctic ocean. Proceedings of the Second WCRP International Conference on Reanalyses WCRP-109, WMO/TD-NO.985. – Geneva, 2000. – P. 253–257.

А.А. Кори́стин*,

кандидат технических наук;

Ю.В. Кулешов*,

доктор технических наук, профессор

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

ПОДХОД К АНАЛИЗУ НАБЛЮДАЕМОСТИ ИОНОСФЕРЫ НАД ТРУДНОДОСТУПНЫМИ ТЕРРИТОРИЯМИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ МОНИТОРИНГА

В интересах оценивания потенциальных возможностей диагностирования ионосферы с использованием космических систем и комплексов предложена постановка задачи анализа наблюдаемости ионосферы над труднодоступными территориями для космических средств наблюдений. Определены возможные пути решения поставленной задачи с применением научно-методического аппарата математической теории систем и дальнейшего использования результатов этого анализа.

Ключевые слова: диагностирование, ионосфера, наблюдаемость, распределенная динамическая система, системный подход, космические системы.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ионосфера оказывает существенное влияние на функционирование радиотехнических систем. Для удовлетворения возрастающих потребностей в оперативной информации о состоянии ионосферы и других факторах космической погоды в последние несколько лет, начиная с 2010 года, на уровне Всемирной метеорологической организации (ВМО) активно ведутся работы по внедрению геофизической информации в оперативную практику гидрометеорологического обеспечения различных видов деятельности. В рамках проводимых работ специалистами ВМО ежегодно осуществляется анализ соответствия существующих возможностей получения геофизической информации текущим потребностям человека.

Над территорией суши основными источниками передаваемой ВМО информации о состоянии ионосферы являются объединенные в сеть наземные станции вертикального зондирования ионосферы [1], станции Международной службы глобальных навигационных спутниковых систем (IGS) и данные радиозатменных наблюдений. Однако получение оперативных данных о состоянии ионосферы над акваториями морей и океанов, а также некоторыми областями суши затруднено. Данная проблема указана в числе основных проблем диагностирования состояния ионосферы на трассах распространения радиосигналов в интересах обеспечения функционирования систем радиосвязи и навигации в последнем отчете Межпрограммной координационной группы по космической погоде (МКГКП) в составе ВМО [2]. В этом случае в качестве основных источников данных могут использоваться существующие и перспективные космические системы и комплексы наблюдений, а также технологии диагностирования ионосферы, построенные на их основе. Основными из таких технологий в настоящее время являются:

- 1) внешнее зондирование (ВнЗ) ионосферы коротковолновыми радиосигналами с борта космического аппарата (КА);
- 2) транзионосферное зондирование (ТИЗ) и обратное транзионосферное зондирование (ОТИЗ) радиосигналами на частотах, близких к критическим;
- 3) ТИЗ сигналами спутниковых радионавигационных систем (СРНС);

- 4) высокоорбитальная и низкоорбитальная спутниковая радиотомография (РТ);
- 5) радиозатменные методы зондирования (РЗ);
- 6) контактные спутниковые измерения;
- 7) моделирование состояния ионосферы на основе известных эмпирических и физических закономерностей и оперативных данных наблюдений (радиозондирования).

Каждая из перечисленных технологий имеет свой уровень развития в Российской Федерации и за рубежом, свои преимущества и недостатки, а также присущие им основные проблемные вопросы развития.

Общие требования к геофизической информации, необходимой для потребителей, и направления их обеспечения регулярно уточняются и приведены в документах МКГКП [3].

Частные требования к геофизической информации, необходимой для повышения эффективности применения радиотехнических систем (радиосвязи и радионавигации) в интересах обеспечения безопасности полетов, сформулированы в работе [4].

Разработан план развития на 2012–2025 годы [5], предполагающий поэтапное совершенствование наземной и космической составляющей глобальной системы наблюдений (ГСН) в целях удовлетворения указанным требованиям.

Необходимым условием удовлетворения общих и специальных требований к получаемой с труднодоступных территорий оперативной геофизической информации об ионосфере является потенциальная возможность получения достаточного объема данных о состоянии ионосферы с такой территории с помощью имеющихся и перспективных космических систем и комплексов. Для описания этой возможности в теории систем используется понятие наблюдаемости объекта [6]. Таким образом, рассматривая ионосферу как динамическую систему, для оценивания возможностей диагностирования ее состояния прежде всего необходимо оценить наблюдаемость этой системы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Поскольку состояние ионосферы зависит не только от времени, но и от пространственных переменных, она представляет из себя систему с распределенными параметрами. В этом случае постановка задачи анализа наблюдаемости распределенной динамической системы представляется в следующем виде.

Объект наблюдения, в нашем случае – ионосфера, рассматривается как распределенная динамическая система с одним входом и выходом [7], описываемая блоком состояния, как показано на рис. 1. Как отмечено выше, широкий практический интерес представляют оперативное наблюдение и прогнозирование поля концентрации электронов в ионосфере.

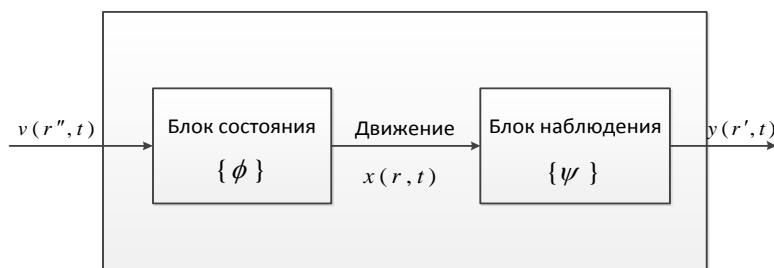


Рис.1. Каноническое представление динамической системы

На ионосферу оказывают возмущающее воздействие $v(r'', t)$ внешние факторы (солнечное излучение, геомагнитные возмущения и др.). Наблюдение состояния ионосферы осуществляется посредством космических систем и комплексов мониторинга и диагностических моде-

лей, представленных в виде блока наблюдения, преобразующего состояние системы $x(r, t)$ в непосредственно наблюдаемый сигнал $y(r', t)$.

Таким образом, в качестве параметров модели динамической системы, представленной на рис. 1, будут выступать величины, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели динамической системы

Параметр	Способы наблюдения с использованием космических систем мониторинга		
	Моделирование состояния ионосферы с использованием данных измерений	ВнЗ, ТИЗ, ОТИЗ, РТ, РЗ	Контактные измерения бортовыми датчиками
$v(r'', t)$	Параметры солнечного излучения, геомагнитной возмущенности, волновых движений в нейтральной атмосфере	То же	То же
$x(r, t)$	Поле концентрации электронов	То же	То же
$\phi(\cdot)$	Решение линеаризованной системы уравнений динамики ионосферной плазмы	То же	То же
$y(r', t)$	Модельные оценки значений концентрации электронов	Параметры зондирующего радиосигнала в пределах области его распространения	Значения концентрации электронов в точках орбиты КА
$\psi(\cdot)$	Решение уравнений диагностической модели ионосферы	Решение линеаризованной системы дифференциальных уравнений распространения радиоволн	Решение уравнения движения КА по орбите

Блоки состояния и наблюдения можно описать дифференциальными операторами:

$$v(r'', t) = l_1(r, t, x(r, t)), \quad (1)$$

$$x(r, t) = l_2(r', t, y(r', t)), \quad (2)$$

где $v(r'', t)$ – возмущающее воздействие в точках области $D'' \subseteq D$ ионосферы с координатами $r'' \in D''$;

t – текущее время, $t \in T$, $T = (-\infty, \infty)$;

$x(r, t)$ – характеристика состояния ионосферы в точках $r \in D$ заданной области;

$y(r', t)$ – обусловленная изменением состояния ионосферы реакция наблюдателя в точках области $D' \subseteq D$ ионосферы с координатами $r' \in D'$.

Уравнения (1), (2) могут быть линеаризованы с помощью существующих методов. Тогда в предположении линейности блоков состояния и наблюдения состояние ионосферы и результаты наблюдения в большинстве случаев будут определяться выражениями [7]:

$$x(r, t) = l_1^{-1}(r'', t, v(r'', t)) = \phi(r'', t, v(r'', t)) = \int_{t_0}^t \int_{D''} G(r, t, \xi, \tau) v(\xi, \tau) d\xi d\tau, \quad (3)$$

$$y(r', t) = l_2^{-1}(r, t, x(r, t)) = \psi(r, t, x(r, t)) = \int_{t_0}^t \int_D N(r', t, \zeta, \eta) x(\zeta, \eta) d\zeta d\eta, \quad (4)$$

- где $\phi(\cdot)$ – переходная функция (отображение) системы $\phi(\cdot): D'' \times T \times V \rightarrow X$ в блоке состояния (нормальная реакция ионосферы на возмущающее воздействие);
- $G(r, t, \xi, \tau)$ – импульсная переходная функция блока состояния (в решении линейаризованного уравнения динамики ионосферной плазмы – функция Грина);
- t_0 – время начала наблюдения, $t_0 \in T$;
- τ – время начала возмущающего воздействия на ионосферу, $\tau \in [t_0, t] \subset T$;
- ξ – координаты точек возмущающего воздействия на ионосферу, $\xi \in D''$;
- $\psi(\cdot)$ – выходное отображение $\psi(\cdot): D \times T \times X \rightarrow Y$ в блоке наблюдения (нормальная реакция системы мониторинга на влияние ионосферы);
- $N(r', t, \zeta, \eta)$ – импульсная переходная функция блока наблюдения (в решении линейаризованного уравнения распространения радиосигнала в ионосфере – функция Грина);
- η – время начала воздействия ионосферы на наблюдателя (систему мониторинга), $\eta \in [t_0, t]$;
- ζ – координаты точек заданной области ионосферы, определяющих характер воздействия ионосферы на наблюдателя (систему мониторинга), $\zeta \in D$.

Оценивание наблюдаемости ионосферы как распределенной системы в общем случае требует исследования интегральных уравнений (3), (4) на предмет существования и единственности их решений. Вместе с тем для объективного оценивания полной наблюдаемости линейных динамических систем с сосредоточенными параметрами существует общий критерий Калмана [6]. Его использование требует аппроксимации модели (3), (4) эквивалентной моделью линейной динамической системы с сосредоточенными параметрами, описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + B\bar{v}(t), \quad (5)$$

$$\bar{y}(t) = C\bar{x}(t), \quad (6)$$

- где $\bar{x}(t)$ – вектор состояния ионосферы;
- $\dot{\bar{x}}(t)$ – полная производная по времени t от вектора $\bar{x}(t)$ состояния ионосферы;
- $\bar{v}(t)$ – вектор возмущающих воздействий на ионосферу;
- A, B, C – матрицы коэффициентов;
- $\bar{y}(t)$ – вектор наблюдаемых параметров.

Одним из способов аппроксимации модели распределенной системы является разбиение этой системы на отдельные подсистемы с сосредоточенными параметрами. Для решения такой задачи необходимо заданную область D ионосферы аппроксимировать регулярной сеточной областью $D_h = \{r_i \in D \mid i = 1(1)m\}$ с постоянным шагом, разбивающей исходную область на подобласти объемом Δr . Тогда сетки в областях $D'' \subseteq D$ и $D' \subseteq D$ будут иметь вид $D''_h = \{r''_j = r_i \mid r''_j \in D'', i = 1(1)m, j = 1(1)n\}$ и $D'_h = \{r'_k = r_i \mid r'_k \in D', i = 1(1)m, k = 1(1)p\}$, а уравнения (3), (4) примут вид:

$$x(r_i, t) = \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n \Delta r G(r_i, t, r''_j, \tau) v(r''_j, \tau) d\tau = \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n \Delta r G_{ij}(t, \tau) v_j(\tau) d\tau, \quad (7)$$

$$y(r'_k, t) = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^m \Delta r N(r'_k, t, r_i, \eta) x(r_i, \eta) d\eta = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^m \Delta r N_{ki}(t, \eta) x_i(\eta) d\eta. \quad (8)$$

Несложно видеть, что уравнения (7), (8) можно представить в матричном виде:

$$\bar{x}(t) = \int_{t_0}^t G(t, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau, \quad (9)$$

$$\bar{y}(t) = \int_{t_0}^t N(t, \eta) \bar{x}(\eta) d\eta, \quad (10)$$

где $\bar{x}(t)$ – вектор состояния ионосферы в узлах сетки D_h ;

$G(t, \tau)$ – матрица, элементы которой – функции Грина для точек с координатами r_i и r_j'' в частном решении линеаризованного уравнения динамики ионосферной плазмы,
 $G(t, \tau) = \left\| \Delta r G_{ij}(t, \tau) \right\|_{i=1, j=1}^{m, n}$;

$\bar{v}(t)$ – вектор возмущающих воздействий на ионосферу в узлах сетки D_h'' ;

$\bar{y}(t)$ – вектор наблюдаемых параметров в узлах сетки D_h' ;

$N(t, \eta)$ – матрица, элементы которой – функции Грина для точек с координатами r_k' и r_j в частном решении уравнений блока наблюдения ионосферы,
 $N(t, \eta) = \left\| \Delta r N_{ki}(t, \eta) \right\|_{k=1, i=1}^{p, m}$.

Если предположить, что возмущающее воздействие на ионосферу оказывается во всей рассматриваемой области D , тогда $D'' = D$, $D_h'' = D_h$ и $n = m$, матрица $G(t, \tau)$ будет представлять собой квадратную матрицу Грина для системы линейных уравнений (5) при выполнении условия:

$$\dot{G}(t, \tau) = AG(t, \tau), \quad (11)$$

где $\dot{G}(t, \tau)$ – полная производная по времени t от матрицы $G(t, \tau)$.

В предположении статичности блока наблюдения (отсутствия переходных процессов в нем, поскольку их характерное время протекания существенно меньше времени изменения состояния ионосферы) импульсная переходная характеристика блока наблюдения не зависит от времени, и тогда можно записать:

$$N(t, \eta) = \left\| \Delta r N_{ki} \delta(t - \eta) \right\|_{k=1, i=1}^{p, m} = N \delta(t - \eta), \quad (12)$$

$$\bar{y}(t) = \int_{t_0}^t N(t, \eta) \bar{x}(\eta) d\eta = N \int_{t_0}^t \delta(t - \eta) \bar{x}(\eta) d\eta = N \bar{x}(t), \quad (13)$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

Таким образом, определив A из выражения (11) и подставляя формулу (13) в (6), получим систему уравнений, описывающих линейную динамическую систему с сосредоточенными параметрами, которая аппроксимирует исследуемую распределенную систему:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \dot{G}(t, \tau) G^{-1}(t, \tau) \bar{x}(t) + \bar{v}(t), \quad (14)$$

$$\bar{y}(t) = N \bar{x}(t). \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) позволяют построить матрицу наблюдаемости и применить критерий Калмана для оценивания полной наблюдаемости ионосферы космическими системами и комплексами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Оценивание возможностей перспективных космических систем и комплексов мониторинга ионосферы требует анализа ее наблюдаемости над труднодоступными территориями с использованием системного подхода, который рассматривает ионосферу как линейную распределенную динамическую систему.
2. Поскольку наиболее общий критерий полной наблюдаемости по Калману разработан только для линейных сосредоточенных систем, его использование для ионосферы возможно путем аппроксимации распределенной системы разбиением на конечное число систем с сосредоточенными в заданных точках пространства параметрами.
3. Дальнейшее развитие предложенного подхода исследования наблюдаемости ионосферы позволит его использовать при решении задач синтеза систем наблюдения.

Список используемых источников

1. *Reinisch B.W., Galkin I.A.* Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) // *Earth Planets Space*. – 2011. – № 63. – P. 377–381.
2. Statement of guidance for Space Weather Services / Version 2, 02 November 2017 // World Meteorological Organization: site. – Geneva, 2016. – URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/SOG/SoG-SW.pdf> (дата обращения: 05.03.2020).
3. The rolling review of requirements / Edited by Secretariat 11/8/2018 // World Meteorological Organization: site. – Geneva, 2016. – URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Documentation/RRR-process.pdf> (дата обращения: 05.03.2020).
4. Интегрированная глобальная система наблюдений ВМО. План осуществления эволюции глобальных систем наблюдений (ПО-ЭГСН): технический доклад № 2013-4. – Женева: Всемирная метеорологическая организация, 2013. – 138 с.
5. Concept of Operations (ConOps) for the Provision of Space Weather Information in Support of International Air Navigation / IAVWOPSG/7-WP/19 Appendix. – Montreal: ICAO, 2012. – 65 p.
6. *Калинин В.Н.* Теоретические основы системных исследований: краткий курс. – Изд. второе, испр. и доп. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 278 с.
7. *Бутковский А.Г.* Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.

В.П. Кулешов*;

Л.М. Митник*,

доктор физико-математических наук;

М.Л. Митник*,

кандидат технических наук

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

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПОЛЯ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМЛИ В ДИАПАЗОНЕ 10–190 ГГц ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СО СПУТНИКОВ МЕТЕОР-М № 2 И № 2-2

Рассмотрены физические факторы, влияющие на уходящее микроволновое (МВ) излучение Земли – на ее яркостную температуру T_y . Яркостная температура подстилающей поверхности определяется пространственными вариациями коэффициента излучения и температуры поверхности T , а T_y атмосферы – вариациями вертикальных профилей давления, температуры и влажности воздуха, фазового состава и водности облаков и осадков.

Глобальные поля $T_y(\nu)$ были измерены сканирующим радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 2 одновременно в 29 спектральных каналах в диапазоне частот $\nu = 6\div 190$ ГГц в 2014–2017 годах [1]. С августа 2019 года измерения выполняются на 31 канале со спутника Метеор-М № 2-2 [2]. Совместный анализ МВ данных, спутниковых видимых и ИК изображений, наземных метеорологических измерений и синоптических карт позволяет оценить вклад отдельных параметров поверхности и атмосферы в $T_y(\nu)$. Использование результатов моделирования переноса МВ излучения существенно повышает правильность интерпретации пространственных вариаций $T_y(\nu)$.

Ключевые слова: микроволновое зондирование, МТВЗА-ГЯ, Метеор-М № 2-2, глобальные данные, яркостная температура, поглощение, водяной пар, облачность, осадки, вертикальные профили температуры, коэффициенты излучения, океан, ветер, земные покровы.

ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом в развитии методов микроволнового дистанционного зондирования Земли являются измерения, которые выполняются радиометром МТВЗА-ГЯ в диапазоне частот $\nu = 6\div 190$ ГГц со спутников Метеор-М № 2 и Метеор-М № 2-2. Радиометр принимает излучение в окнах прозрачности атмосферы на $\nu = 6,9, 10,6, 18,7, 23,8, 31,5, 36,5, 42,0, 48,0$ и $91,6$ ГГц и в областях поглощения кислорода $52\text{--}57$ ГГц и водяного пара $176\text{--}190$ ГГц, объединяя тем самым функции сканера и зондировщика [1, 2].

На частотах сканера яркостная температура излучения $T_y(\nu)$ на вертикальной (в) и горизонтальной (г) поляризациях при угле падения θ может быть представлена в виде суммы трех слагаемых в предположении малости космического излучения:

$$T_y^{B,G}(\nu, \theta) = T_{\text{япвга}}(\nu) + T_{\text{ятм}}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{\text{ятм}}^{\downarrow}(\nu, \theta) [1 - \kappa^{B,G}(\nu, \theta, T_0)] e^{-\tau(\nu) \sec \theta}. \quad (1)$$

В формуле (1) введены следующие обозначения:

$T_{\text{япвга}}(\nu) = T_{\text{я пов}}(\nu) e^{-\tau(\nu) \sec \theta}$ – яркостная температура поверхности на верхней границе атмосферы;

$T_{\text{я пов}}(\nu) = \kappa^{B,G}(\nu, \theta, T_0) \times T_0$, где $\kappa^{B,G}(\nu, \theta, T_0)$ – коэффициент излучения, а T_0 – температура подстилающей поверхности;

$\tau(\nu) = \int_0^{\infty} (\gamma, h) dh$ – полное поглощение атмосферы в зените, определяемое поглощением в кислороде $\tau_k(\nu)$, водяном паре $\tau_{\text{вп}}(\nu)$, облаках $\tau_{\text{обл}}(\nu)$ и осадках $\tau_{\text{осад}}(\nu)$;

$\gamma(\nu, h)$ – вертикальный профиль коэффициента поглощения в атмосфере, где h – высота над поверхностью;

$T_{\text{я}}^{\uparrow}(\nu, \theta)$ и $T_{\text{я}}^{\downarrow}(\nu, \theta)$ – яркостные температуры восходящего и нисходящего излучений атмосферы соответственно.

Поля $T_{\text{япвга}}(\nu)$ отображают распределение типов покровов с различными значениями коэффициента излучения $\kappa^{\text{Б,Г}}(\nu, \theta)$ (океаны, моря, реки, болота, леса, степи, горы, пустыни, лед и др.) и различными температурами поверхности, а также визуализируют динамические процессы, связанные с выпадением жидких и твердых осадков, волнами тепла, изменением характеристик растительности и др. Приращения $T_{\text{япвга}}$ зависят от частоты и поляризации излучения и от поглощения в атмосфере.

Динамические процессы в атмосфере, которые сопровождаются изменением температуры тропосферы и стратосферы, содержания в атмосфере водяного пара, водозапаса облаков и интенсивности осадков, влияют на яркостные температуры восходящего и нисходящего излучений атмосферы [второе и третье слагаемые в формуле (1) соответственно] и, следовательно, на яркостную температуру $T_{\text{я}}^{\text{Б,Г}}(\nu)$. Изменения метеорологических параметров наблюдаются во внетропической зоне конвергенции (ВЗК), в тропических и внетропических циклонах, во фронтах, конвективных комплексах, атмосферных реках, при адвекции холодных и теплых воздушных масс и в других процессах [1–4]. Зависимость $T_{\text{я}}^{\text{Б,Г}}(\nu)$ от частоты служит основой для восстановления паросодержания атмосферы, водозапаса облаков и интенсивности осадков по яркостным температурам на сканерных каналах [5, 6] и для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы на частотах зондировщика [7].

На частотах зондировщика 52,8–57,3 ГГц и 176–190 ГГц вклад в $T_{\text{я}}^{\text{Б,Г}}(\nu)$ первого и третьего слагаемых из формулы (1) можно не учитывать из-за большого поглощения в атмосфере на луче зрения $\tau_0(\nu)\sec\theta$, и яркостная температура может быть найдена по соотношению

$$T_{\text{я}}^{\uparrow}(\nu) = \int_0^{\infty} T(h)K(\nu, h)dh, \quad (2)$$

где $T(h)$ – вертикальный профиль температуры воздуха;

$K(\nu, h)$ – весовая функция, определяющая вклад в $T_{\text{я}}^{\uparrow}(\nu)$ различных слоев атмосферы,

$$K(\nu, h) = \gamma(\nu, h)\sec\theta e^{-\int_h^{\infty} \gamma(\nu, h')\sec\theta dh'}.$$

Глобальные поля $T_{\text{я}}^{\text{Б,Г}}(\nu)$, полученные одновременно на каналах сканера и зондировщика и анализируемые совместно с видимыми и ИК спутниковыми изображениями и с иной сопутствующей дистанционной и контактной геофизической информацией, дают наглядное представление об изменчивости параметров поверхности, тропосферы и стратосферы и об их взаимодействии в различные сезоны. Высказанные положения подтверждены результатами измерений со спутника Метеор-М № 2 и моделирования переноса излучения [1–4].

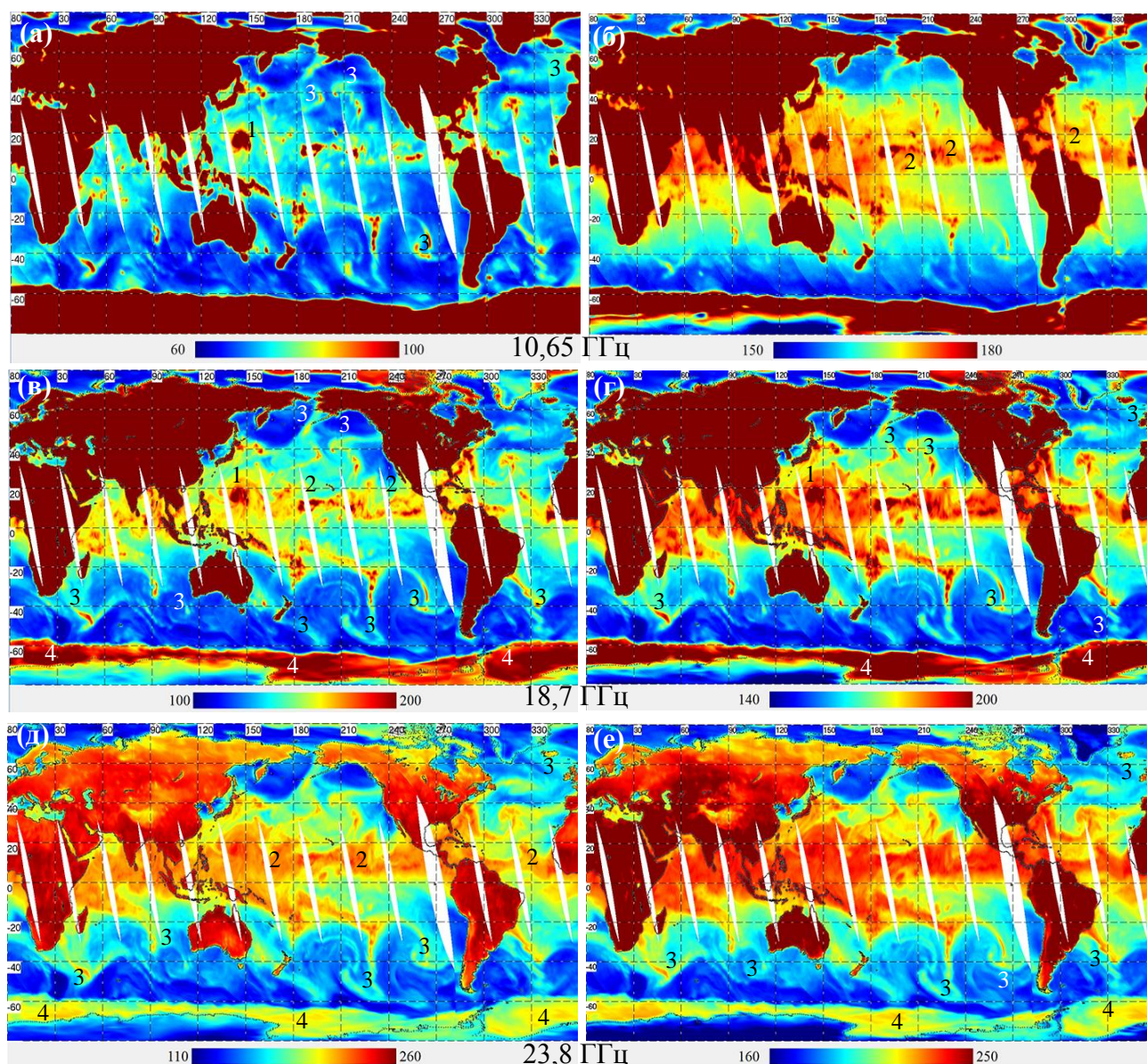
Цель работы заключается в изучении и интерпретации процессов взаимодействия земных покровов, океана и атмосферы на синоптическом и сезонном масштабах по глобальным полям $T_{\text{я}}$, полученным МТВЗА-ГЯ одновременно на 22 частотах в диапазоне $\nu = 6\div 190$ ГГц.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПОЛЯ НА ЧАСТОТАХ ИМАДЖЕРА

На рис. 1 показаны глобальные поля $T_{\text{я}}$ на $\nu = 10,6, 18,7$ ГГц и 23,8 ГГц на В- и Г-поляризациях по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках 8 октября 2019 года. Границы шкал на каждом канале выбраны так, чтобы подчеркнуть влияние на $T_{\text{я}}$ одного или ряда параметров океана или атмосферы. Влияние скорости приводного ветра W отчетливо выражено в поле $T_{\text{я}}(10\text{Г})$, как на рис. 1,а. Зоны усиления ветра прорисовывают структуру циклонов и атмосферных фронтов (цифры 1 и 3 на рис. 1,а), поскольку производная

$\partial T_{\text{я}}(10\text{Г})/\partial W \approx 0,7 \div 0,9 \text{ К}/(\text{м}/\text{с})$. Влияние температуры поверхности океана t_0 на В-поляризации заметно больше, чем на Г-поляризации. Производная $\partial T_{\text{я}}(10\text{В})/\partial t_0 \approx 0,4 \div 0,5 \text{ К}/^\circ\text{С}$. Поэтому $T_{\text{я}}$ тропической зоны, где $t_0 > 25^\circ\text{С}$, выше, и она выделяется на рис. 1,б. Высоким яркостным контрастом на фоне океана обладает морской лед вокруг Антарктиды, обозначенный цифрой 4 на рис. 1,б и в, на рис. 2,а–в.

Рост поглощения в облаках, осадках и в водяном паре проявляется при наблюдении тайфунов, внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), циклонов и др., что иллюстрируют рис. 1 и 2, на которых цифрами 1–3 отмечены упомянутые атмосферные образования. Однако на частотах $\nu > 40 \text{ ГГц}$ при интерпретации вариаций яркостных температур в районах с мощной облачностью и осадками необходимо учитывать рассеяние излучения на каплях дождя и частицах града. Рассеяние приводит к уменьшению $T_{\text{я}}(\nu)$.

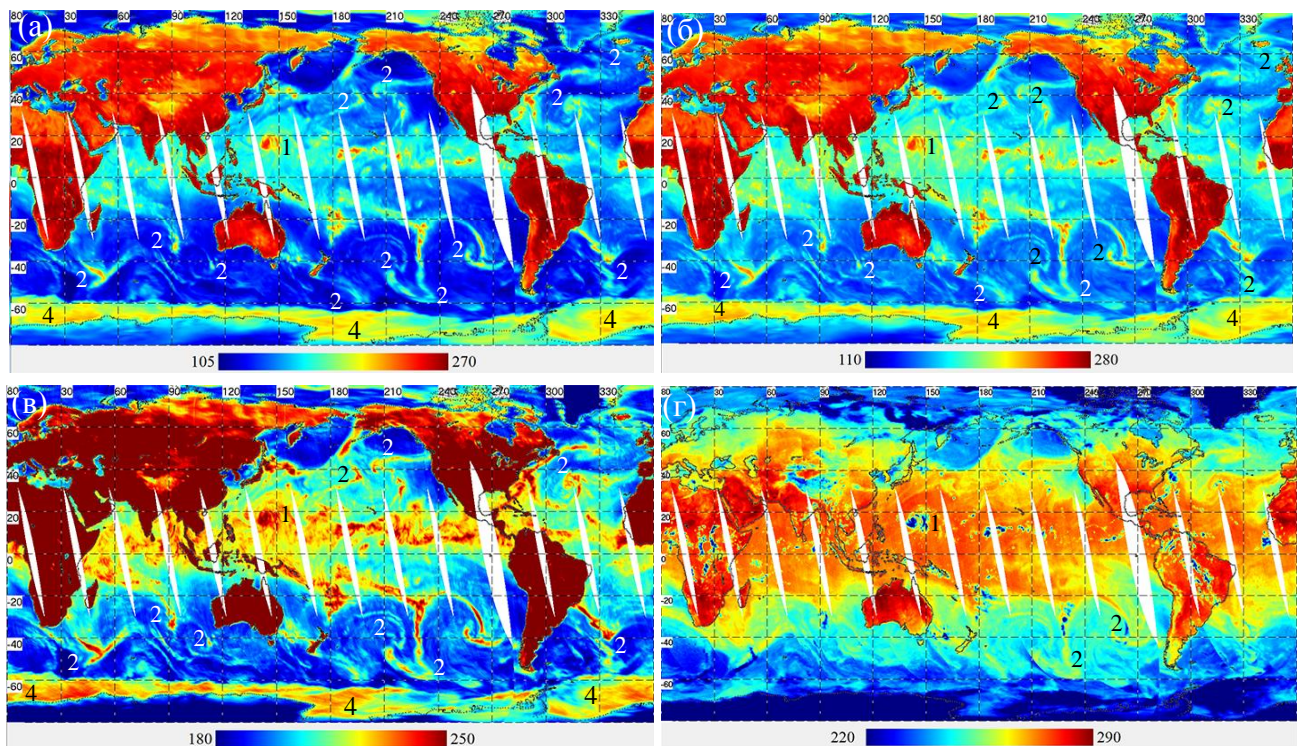


Яркостная температура, К

Рис. 1. Яркостная температура Земли 8 октября 2019 г. на частотах 10,65 ГГц (а, б), 18,7 ГГц (в, г) и 23,8 ГГц (д, е) на горизонтальной (а, в, д) и вертикальной (б, г, е) поляризациях по измерениям МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М №2-2; 1 – тайфун Hagibis; 2 – внутритропическая зона конвергенции; 3 – циклоны и атмосферные реки; 4 – морской лед

Пятна пониженных значений $T_{\text{я}}$ хорошо видны в поле $T_{\text{я}}(91\text{В})$ над тайфуном Hagibis, над ВЗК, атмосферными фронтами, конвективными дождевыми ячейками над Африкой и Южной Америкой (рис. 2, *з*).

Чувствительным индикатором циркуляции атмосферы и переноса тепла и влаги служит водяной пар. Сведения о паросодержании атмосферы и о вертикальном профиле влажности воздуха дают поля $T_{\text{я}}$ на частотах в областях резонансных линий водяного пара, центрированных на 22,235 ГГц (рис. 1, *д* и *е*) и 183,31 ГГц (рис. 3, *а* и *б*). Совместное рассмотрение полей $T_{\text{я}}$ на частотах, показанных на рис. 1–3, дает представление о тесной связи характеристик влажности атмосферы, водозапаса облаков и осадков в погодных системах тропических, умеренных и высоких широт над Мировым океаном.



Яркостная температура, К

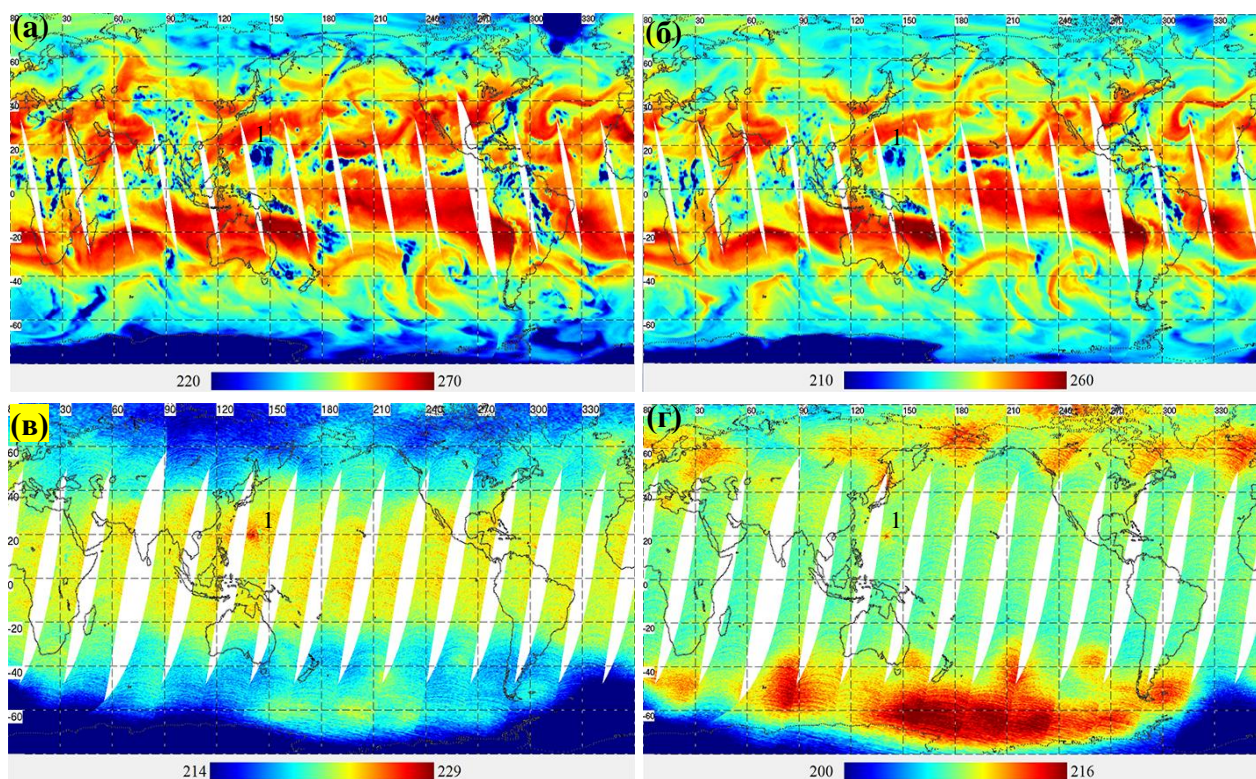
Рис. 2. Яркостная температура Земли 8 октября 2019 г. на частотах 31,5 (*а*), 36,5 (*б*), 42,0 (*в*) и 91,65 ГГц (*г*) на горизонтальной (*а–в*) и вертикальной (*д*) поляризациях по измерениям МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 2-2; 1 – тайфун Hagibis; 2 – внутритропическая зона конвергенции; 3 – циклоны и атмосферные реки; 4 – морской лед

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПОЛЯ НА ЧАСТОТАХ ЗОНДИРОВЩИКА

Анализ измерений МТВЗА-ГЯ показывают взаимосвязи явлений на поверхности и в атмосфере с вертикальными профилями температуры $T(h)$ и относительной влажности $u(h)$ воздуха, вариации которых регистрируются в диапазонах 52–57 ГГц и 186–190 ГГц соответственно. Излучение на $183,3 \pm 7$, $183,3 \pm 3$ и $183,3 \pm 1,4$ ГГц формируется в нижней, средней и верхней тропосфере и зависит и от $u(h)$, и от $T(h)$, что усложняет решение обратной задачи – восстановления вертикального профиля влажности. Максимумы весовых функций [формула (2)] для $183,3 \pm 7$, $183,3 \pm 3$ ГГц расположены на высотах 6, 9 и 12 км в тропиках и на 2, 5 и 7 км зимой в Арктике, а полуширина составляет $\approx 4 \div 5$ км. На рис. 3, *а* и *б* в полях $T_{\text{я}}$ видны спирали циклонов в Северном и Южном полушарии и пятна низких температур,

обусловленные рассеянием МВ излучения на частицах, в том числе и в тайфуне Hagibis (цифра 1 на рис. 3)..

Данные зондирования на 10 частотах в полосе поглощения кислорода обеспечивают восстановление профиля $T(h)$ от поверхности до высоты ≈ 40 –50 км. Максимумы весовых функций расположены на высотах от ≈ 3 до ≈ 42 –44 км, а полуширина составляет 10–12 км. Оценки получены с использованием стандартных профилей температуры и давления для различных широтных зон и сезонов [8]. Глобальные поля T_y на частотах 53,3 и 53,8 ГГц показаны на рис. 3, в и г. Излучение на этих частотах характеризует температуру слоев атмосферы на высотах 2–12 и 5–15 км соответственно. Хорошо заметны различия в полях T_y между полушариями, тропическими и полярными широтами, между различными высотами. Развитая конвекция в тайфуне Hagibis выделяется по положительному контрасту относительно фона.



Яркостная температура, К

Рис. 3. Яркостная температура Земли 8 октября 2019 г. на $\nu = 183,3 \pm 7$ (а), $183,3 \pm 3$ (б), $53,3$ (в) и $53,8$ ГГц (г) на восходящих (а–в) и нисходящих (д) витках по измерениям МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М №2-2; 1 – тайфун Hagibis; 2 – внутритропическая зона конвергенции; 3 – циклоны и атмосферные реки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Измерения микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 2-2 являются источником ежедневной количественной информации о глобальных полях яркостной температуры Земли, о процессах на поверхности, в тропосфере и стратосфере и их взаимосвязях. Для количественного анализа особенностей, регистрируемых в полях $T_y^{B, \Gamma}(\nu)$ на различных частотах, поляризациях и углах падения, а также для внешней калибровки радиометра и разработки алгоритмов восстановления геофизических параметров, необходи-

мо использовать результаты численных экспериментов с моделью переноса МВ излучения в системе подстилающая поверхность – атмосфера [1–3].

2. Данные, полученные МТВЗА-ГЯ, находятся в хорошем согласии с радиозондовыми и метеорологическими измерениями и результатами моделирования переноса излучения.

3. Измерения МТВЗА-ГЯ на спутниках Метеор-М №2-2 и последующих продолжат мониторинг природных процессов и функционирования микроволнового радиометра в условиях космического полета.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-17-00179.

Список используемых источников

1. Моделирование яркостной температуры и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 / Г.М. Чернявский, Л.М. Митник, В.П. Кулешов и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – № 3. – С. 51–65.

2. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника Метеор-М № 2 / Г.М. Чернявский, Л.М. Митник, В.П. Кулешов и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 8–100.

3. Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: modeling, calibration and measurements / L. Mitnik, V. Kuleshov, M. Mitnik et al. // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 10, № 7. – P. 3036–3045. – Doi: 10.1109/JSTARS.2017.2695224.

4. Passive microwave observations of South America and surrounding oceans from Russian Meteor-M No. 2 and Japan GCOM-W1 satellites / L.M.Mitnik, V.P. Kuleshov, M.L. Mitnik, A.V. Baranyuk // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 39, № 13. – P. 4513–4530.

5. Митник М.Л., Митник Л.М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 4. – С. 34–41.

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

7. 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.

8. ГОСТ Р 53460-2009. Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры. – URL: gostbase.ru (дата обращения: 12.03.2020).

К.А. Лобанов

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

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В публикации рассмотрен радиофизический метод диагностики состояния ионосферы на основе регистрации сигналов космических аппаратов космических навигационных систем (КНС) ГЛОНАСС/GPS с использованием моделей справочной ионосферы и справочного полного электронного содержания (ПЭС) плазмосферы, позволяющий уменьшить погрешность определения параметров слоев ионосферы, для ионосферного обеспечения функционирования радиотехнических систем контроля объектов космического пространства.

Ключевые слова: радиотехническая система, космический объект, модель ионосферы, модель плазмосферы, радиофизический метод, космическая навигационная система, полное электронное содержание.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач радиотехнических систем контроля космического пространства является идентификация космических объектов, в том числе так называемого «космического мусора», представляющего собой находящиеся на орбите нефункционирующие антропогенные материалы: отработанные ступени ракет-носителей, осколки космических аппаратов (КА), образованные в результате их столкновений.

Так, 11 января 2007 года Китаем был уничтожен метеорологический КА, в результате чего образовалось около 900 его фрагментов. 10 февраля 2009 года имел место первый случай столкновения КА, когда Iridium 33 и Космос-2251 столкнулись на скорости 24140 км/ч, что привело к появлению около 2000 обломков.

Излишне обосновывать необходимость контроля таких объектов «космического мусора», учитывая всю опасность, которой подвергаются и КА и пилотируемые станции.

Для контроля космического пространства используются как оптические, так и радиолокационные средства, работающие в дециметровом диапазоне длин волн.

В данной работе рассмотрим вопрос геофизического (ионосферного) обеспечения функционирования радиолокационных систем контроля объектов космического пространства.

Общеизвестно [1], что факторы ионосферы влияют на эффективность работы радиотехнических систем различного назначения, таких как системы радиосвязи, радиолокации, радионавигации, в том числе в дециметровом диапазоне длин волн.

Оперативная диагностика и прогнозирование состояния ионосферы в реальном масштабе времени необходимы для оперативного учета влияния факторов ионосферы на работу радиотехнических систем.

Среди методов диагностики радиофизические методы, использующие сигналы КА КНС ГЛОНАСС/GPS, характеризуются наибольшими оперативностью, глобальностью, скрытностью, пространственно-временным разрешением, а также низкой стоимостью. Практическая безальтернативность этих методов обусловлена слабо развитой сетью станций вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы в нашей стране.

В продолжение данного направления исследований в работе представлен новый радиофизический метод диагностики состояния ионосферы.

ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В радиофизическом методе диагностики состояния ионосферы применяется модель ионосферы. Входными параметрами модели ионосферы являются индексы солнечной активности (СА), например число Вольфа (число солнечных пятен W) или поток радиоизлучения Солнца $F_{10,7}$ на длине волны 10,7 см, доступные только на зарубежных электронных ресурсах и с низкой оперативностью и достоверностью.

Альтернативой данным индексам являются эффективные (или ионосферные) индексы СА. Эффективный индекс СА – это индекс СА (входной параметр модели), при котором значения модельных параметров ионосферы равны экспериментально измеренным значениям параметров ионосферы [2].

К примеру, в целях составления прогноза распространения радиоволн в ионосфере было предложено использовать ионосферные индексы СА: IF_2 , T или IE – в зависимости от выбора слоя ионосферы, чья критическая частота будет использоваться в качестве основного параметра [2]. Данная идея была развита в работах [3, 4], где авторами было показано, что среднемесячный ионосферный индекс GESSN (Global Effective SunSpot Number), рассчитанный по данным сети ионосферных станций, позволяет уменьшить, по сравнению с зависимостью от числа Вольфа W , значение среднеквадратического разброса критической частоты f_0F_2 слоя F2: для зимнего периода на 35%, для летнего – на 32% и для равноденствия – на 50%.

В работе [5] было предложено использовать амплитуду суточной вариации ПЭС, определяемую по измерениям угла поворота плоскости поляризации сигналов геостационарных КА, как исходный ионосферный параметр при построении индекса СА.

В работе [4] описана методика определения ионосферного индекса СА на основе сигналов низкоорбитальных КНС «Циклон»/«Цикада».

С внедрением космических технологий во все сферы жизни и в мировом масштабе возникла необходимость в обеспечении самих КНС, а также их наземных потребителей информацией о состоянии ионосферы. Например, для обеспечения европейской КНС «Galileo» была создана модель NeQuick [6] как неотъемлемый элемент системы коррекции КНС (расчета ионосферных поправок). При этом эффективный индекс A_z состояния ионосферы, рассчитываемый по данным наземных станций, оказался зависим от пространственных координат и имеет малую корреляцию с прямым индексом $F_{10,7}$ (значение коэффициента корреляции составляет около 0,65).

Наиболее актуальные разработки в области способов определения эффективных индексов были выполнены в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского в 2013 году [7] на примере индекса СА FTEC в целях модернизации Российской системы дифференциальной коррекции и мониторинга КНС ГЛОНАСС в части расчета карт ионосферных задержек.

ПРЕДПОСЫЛКИ К РАЗРАБОТКЕ НОВОГО МЕТОДА

Ранее [8] был описан факт увеличения погрешностей диагностирования параметров ионосферы на примере критической частоты f_0F_2 в методике расчета ионосферного индекса, применяемой в радиофизическом методе [9, 10], когда на смену КНС «Циклон/Цикада» (высота орбиты 1000 км) пришли КНС ГЛОНАСС/GPS (высота орбиты 19000–20000 км). Причиной выявленного факта может являться неудовлетворительная точность описания моделями ионосферы вертикального распределения концентрации электронов на высотах выше слоя F2 (включая высоты плазмосферы), используемых в методике расчета ионосферного индекса [11–14].

В работе [8] была доказана актуальность проведения исследований в данном направлении и описана процедура разработки модели справочного ПЭС плазмосферы на основе данных

экспериментальных измерений ПЭС в интервале высот от 500 до 20000 км. Источником данных ПЭС явились результаты регистрации сигналов GPS на борту низкоорбитальных КА «FORMOSAT-3» системы COSMIC (constellation observing system for meteorology, Ionosphere, and climate – система обзора для решения задач метеорологии, изучения ионосферы и климата).

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Структура разработанного метода представлена на рис. 1. Метод основан на обработке сигналов КА КНС ГЛОНАСС/GPS и применении справочных моделей ионосферы IRI и ПЭС плазмосферы TECpl [8]. Содержательно он заключается в следующем. Зарегистрированные параметры сигналов КНС пересчитываются [15] в ПЭС (атрибутивный геофизический параметр просвечиваемой толщи ионизированной среды). Далее выполняется определение некоторого эффективного индекса W_3 [9] путем итерационного сравнения модельного ПЭС и экспериментального ПЭС (рассчитанного с помощью КНС). При очередном значении W – входного параметра модели ионосферы – модельный и экспериментальный ПЭС сравниваются, и текущее значение W объявляется эффективным индексом (W_3) СА, характеризующим текущее состояние просвечиваемой толщи ионосферы и наиболее корректно «настраивающим» используемую модель ионосферы.

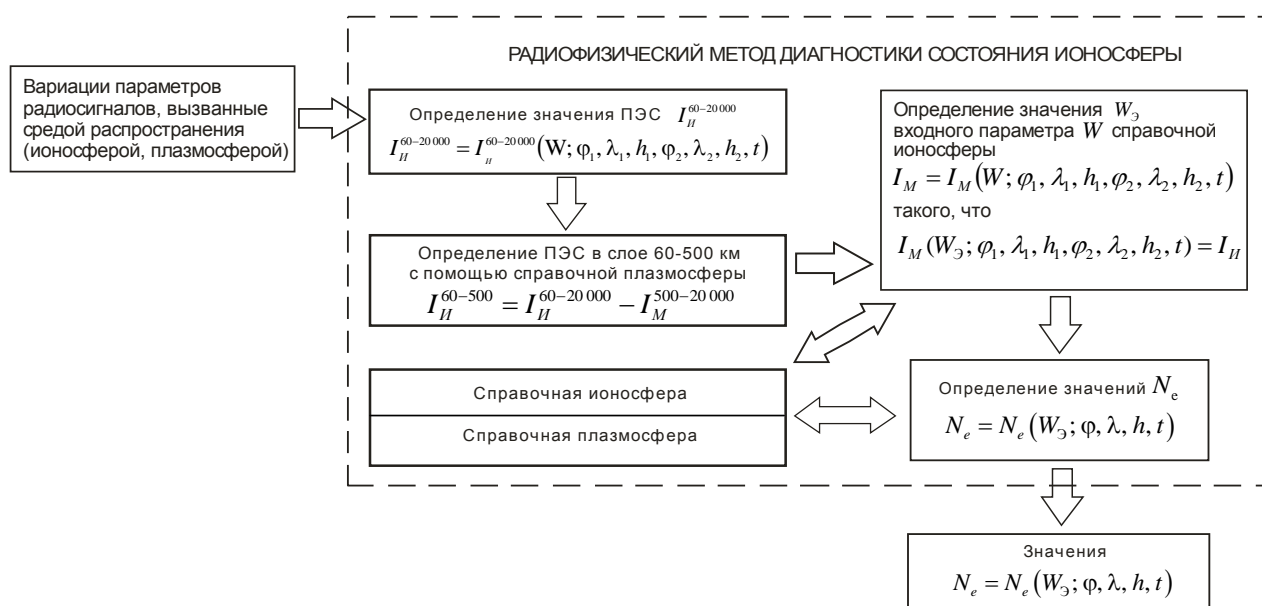


Рис. 1. Структурная схема разработанного радиофизического метода диагностики состояния ионосферы

На рисунке введены обозначения: $I_{И}$ – экспериментальное значение ПЭС; I_M – модельное (IRI) значение ПЭС; $I_{И}^{60-20000}$ – экспериментальный ПЭС в диапазоне 60–20000 км; $I_M^{500-20000}$ – модельный (TECpl) ПЭС в диапазоне 500–20000 км; $I_{И}^{60-500}$ – рассчитанный ПЭС в диапазоне 60–500 км; φ, λ, h – географические широта, долгота и высота над уровнем земли в точке расчета модельного значения концентрации электронов; $\varphi_1, \lambda_1, h_1$ – географические широта, долгота и высота над уровнем земли в точке отправки сигнала от КА СРНС; $\varphi_2, \lambda_2, h_2$ – географические широта, долгота и высота над уровнем

земли в точке регистрации сигнала от КА СРНС; t – время регистрации сигнала; N_e – концентрация электронов.

В данном методе (см. рис. 1) экспериментальное значение ПЭС в слое 60–500 км рассчитывалось путем вычитания из экспериментального ПЭС в слое 60–20000 км модельного значения в слое 500–20000 км, полученного из разработанной модели справочного ПЭС плазмосферы TECp1. Модельное значение ПЭС в слое 60–500 км рассчитывается с помощью модели IRI.

Таким образом, данный подход предполагает отказ от моделирования верхней части (свыше 500 км) профиля концентрации электронов в ионосфере и плазмосфере и уточнение за счет этого эффективного индекса СА.

При определении эффективного индекса СА [9] и далее в методе не удалось избежать пересчета наклонного ПЭС в вертикальный ПЭС по причине формализации моделью справочного ПЭС плазмосферы именно значений вертикального ПЭС. Для минимизации же погрешностей использования приближения «тонкого слоя» использовался фильтр по углу места КА КНС, равный 45° .

Проиллюстрировать результативность предлагаемого метода было решено на примере расчета критической частоты f_0F2 слоя F2.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В настоящее время справочные модели ионосферы, например модель IRI, очень популярны, в том числе по причинам доступности, открытости, обновляемости и бесплатности. Предлагается выполнить проверку разработанного метода на примере расчета критической частоты f_0F2 для следующих случаев: 1) использования модели IRI-2016 совместно с индексом $F_{10.7}$; 2) использования справочной модели ионосферы IRI-2016 и модели справочного ПЭС плазмосферы.

Так, было выполнено моделирование состояния ионосферы для г. Москва, время – 12 ч гринвичского времени¹.

По результатам эксперимента среднеквадратическая ошибка критической частоты f_0F2 слоя F2 составила: при использовании модели IRI-2016 совместно с индексом $F_{10.7}$ – 18,3%; для разработанного метода – 11,1%. При этом значения эффективного индекса СА в разработанном методе отличались от индекса $F_{10.7}$ в среднем на 6–8 единиц. Объем выборки f_0F2 составил 266 измерений в период с марта по май 2018–2019 гг. – время спокойных геомагнитных условий ($K_p \leq 3$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при выборе метода диагностики состояния ионосферы для задач геофизического обеспечения функционирования радиотехнических систем контроля объектов космического пространства целесообразно остановиться на новом радиофизическом методе, характеризующемся наименьшей погрешностью диагностирования параметров ионосферы.

Разработанный метод также может быть использован для задач геофизического обеспечения функционирования таких радиотехнических средств, использующих ионосферу в качестве среды распространения радиосигнала, как средства радиосвязи, радиопеленгации, радионавигации и др.

¹ Данные ионозонда г. Москва ($55,8^\circ$ с.ш., $37,6^\circ$ в.д.) были взяты в сети интернет по адресу <http://legacy-www.swpc.noaa.gov>.

Список используемых источников

1. *Альперт Я.Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972.
2. *Minnis A* new index of Solar activity based on ionospheric measurements // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1955. – Vol. 77. – P. 310–321.
3. *Minnis, Bazzard G.H.* Some indices of Solar activity based on ionospheric and radio noise measurements // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1959. – Vol. 14. – P. 213–228.
4. Оперативная оценка состояния околоземного космического пространства / В.И. Ашманец, А.И. Зубарев, М.Ю. Ортиков, Б.В. Троицкий // Геомагнетизм и аэрономия. – 2000. – Т. 40, №1. – С. 109–112.
5. Способ прогнозирования индекса солнечной активности: а. с. / Д.З. Таипов, Б.В. Троицкий. – № 1556367 от 10.12.1989.
6. A flexible 3d Ionospheric model for satellite navigation applications / S.M. Radicella, R. Leitinger, B. Nava and P. Coisson // In Proceedings of International Symposium on GPS/GNSS. – Tokyo, Japan, 2003.
7. Ionospheric total electron content modelling and the estimation of errors in coordinate measuring caused by solar activity in remote sensing / A. Devyatkin, I. Gotur, V. Krasnov et al. // International Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 35, № 15. – P. 5913–5925.
8. *Шемелов В.А., Лобанов К.А.* Модель справочного полного электронного содержания плазмосферы // Ученые записки РГГМУ. – 2012. – № 25. – С. 68–79.
9. Ionospheric index of solar activity based on the data of measurements of the spacecraft signals characteristics / M.Y. Ortikov, V.A. Shemelov, I.V. Shishigin, B.V. Troitsky // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2003. – Vol. 165. – P. 1425–1430.
10. Ионосферное обеспечение коротковолновой радиосвязи с использованием карт полного электронного содержания / Б.В. Троицкий, М.Ю. Ортиков, К.А. Лобанов и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47, № 3. – С. 413–418.
11. *Полтавский О.С.* Методы обеспечения КВ-трасс информацией о состоянии ионосферы: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук / О.С. Полтавский. – Ростов н/Д.: Юж. федер. ун-т, 2009. – 24 с.
12. A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere / S. Stankov, N. Jakowski, S. Heise et al. // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108. – P. 1164–1180.
13. *Coisson P., Radicella S. M.* Ionospheric topside models compared with experimental electron density profiles // Ann. Geophys. – 2005. – Vol. 48, № 3. – P. 497–503.
14. New option for IRI topside electron density profile using NeQuick model / P. Coisson, S.M. Radicella, R. Leitinger, B. Nava // IRI NewsLetter. – 2005. – № 12. – P. 5–7.
15. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* Position System: Theory and Practice. – Global, 1992. – 327 p.

Р.Ю. Лукьянова,
доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН, г. Москва.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В F-ОБЛАСТИ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Численная модель F-области высокоширотной ионосферы предназначена для оперативного расчета трехмерного распределения электронной концентрации (N_e) в зависимости от гелиогеофизических условий. Учитывается влияние электрических полей магнитосферной конвекции на распределение электронной концентрации. Траектории конвекции моделируются в блоке расчета электрических полей в зависимости от входных параметров: значений межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра, дня года, мирового времени, уровня геомагнитной и солнечной активности. В ионосферном блоке рассчитывается высотное распределение N_e в конвектирующей плазменной трубке. Учитываются обобщенный молекулярный ион и ион O^+ . Модель адекватно воспроизводит основные крупномасштабные неоднородности полярной ионосферы.

Ключевые слова: полярная ионосфера, электронная концентрация, электрическое поле, конвекция плазмы, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Неоднородности электронной концентрации (N_e) в F-области высокоширотной ионосферы оказывают значительное влияние на распространение радиоволн. В субавроральных широтах основной неоднородностью является главный ионосферный провал (ГИП), связанный с уменьшением N_e в вечернем секторе вследствие стагнации дрейфа плазмы при противоположно направленных электрических полях конвекции и коротации. Области повышенных значений N_e представлены в виде аврорального и полярного пиков. Повышение N_e часто простирается через полюс с дневной стороны на ночную, формируя язык ионизации. Полярная плазменная полость характеризуется уменьшением N_e на широтах $70-80^\circ$ MLat. Структура неоднородностей в большой степени зависит от ориентации межпланетного магнитного поля (ММП), что наиболее ярко проявляется в зимних условиях неосвещенной ионосферы [1].

В связи с ограниченным количеством пунктов регулярных наблюдений в высоких широтах эмпирические модели не могут дать детального описания структуры полярной ионосферы для реальных гелиогеофизических условий [2]. Поэтому актуальной задачей является разработка и использование физико-математической модели, которая позволила бы получить необходимую информацию о состоянии полярной ионосферы.

СТРУКТУРА МОДЕЛИ

Модель рассчитывает трехмерное распределение N_e в полярной ионосфере и состоит из двух блоков. В первом блоке с целью определения траекторий, вдоль которых дрейфует плазменная трубка, рассчитываются геометрические и электродинамические параметры картин конвекции ионосферной плазмы. Так как на высотах >120 км плазма замагничена, линии конвекции совпадают с изолиниями ионосферного электрического потенциала. В рамках модели распределение электрического потенциала описывается соответствующими аналитическими формулами. Во втором блоке решается задача интегрирования по высоте конвективно-диффузионного уравнения и уравнения фотохимического равновесия в вертикальной плазменной трубке, дрейфующей под действием электрических полей магнитосферной конвекции и коротации.

Блок-схема модели представлена на рис. 1. Входными параметрами модели являются значения B_z и B_y ММП, скорость солнечного ветра (V_{CB}), день года и универсальное время, а также индексы солнечной ($F_{10.7}$) и геомагнитной активности (K_p).

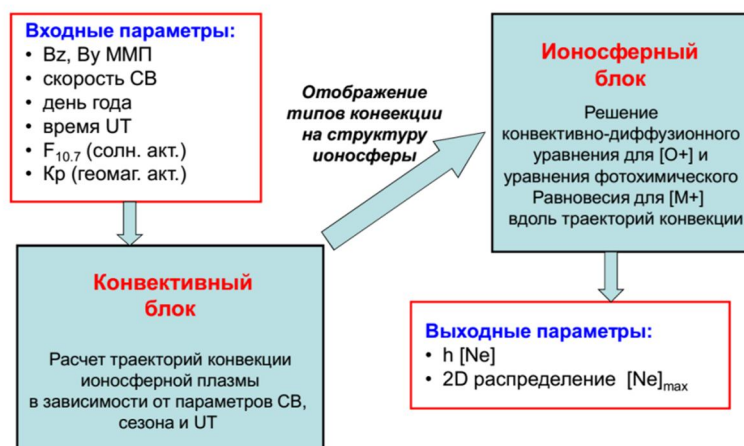


Рис. 1. Блок-схема модели

Расчет траекторий конвекции. В конвективном блоке производится расчет траекторий конвекции плазменных трубок. Уравнения дрейфа записываются в геомагнитных сферических координатах r, θ, φ (r – радиус, θ – коширота, φ – геомагнитная долгота). Скорость движения заряженной частицы определяется суммой скорости коротации $V_K = (0, 0, \omega \cdot r \cdot \sin\theta)$ и скорости дрейфа плазмы в скрещенных электрическом (\mathbf{E}) и магнитном (\mathbf{B}) полях. Система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая конвективные траектории, имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} d\theta/dt &= -2 \cdot E_\varphi \cdot (R^2/M) \cdot \cos\theta / (3 \cdot \cos^2\theta + 1); \\ d\varphi/dt &= E_\theta \cdot (R^2/M) \cdot (2 \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta)^{-1} + \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где M – магнитный момент Земли,
 ω – частота углового вращения Земли,
 $R = R_E + 200$ км,
 R_E – радиус Земли,
 t – время.

В конвективном блоке воспроизводятся все известные из эксперимента характерные профили ионосферного электрического поля вдоль утренне-вечернего меридиана. Двумерные картины конвекции ионосферной плазмы для различных сочетаний параметров межпланетной среды обнаруживают 2-, 3- и 4-вихревые структуры. Учет электрического поля коротации видоизменяет структуру траекторий конвекции (рис. 2). В частности, коротация ведет к появлению застойной области между вечерним и ночным меридианами, что является одной из причин формирования ГИП.

Расчет структуры ионосферы. Ионосферный блок описывает трехмерное распределение Ne в F-области. В точках, расположенных вдоль траекторий конвекции, решается одномерная задача интегрирования нестационарного конвективно-диффузионного уравнения для O^+ и уравнения фотохимического равновесия для концентрации обобщенного молекулярного иона M^+ :

$$\partial O^+ / \partial t = \partial / \partial z (D \partial O^+ / \partial z + R O^+) + Q_{O^+} - L; \quad (2)$$

$$Q_{M^+} + \beta O^+ = \alpha_{\phi\phi} M^+ (M^+ + O^+). \quad (3)$$

В уравнении (2) коэффициенты D, R, L получены на основе выражений для вертикальной скорости ионов O^+ , зависящей от скорости ионообразования, параметров термосферы, частот соударений, географических координат, значений электрического и магнитного полей.

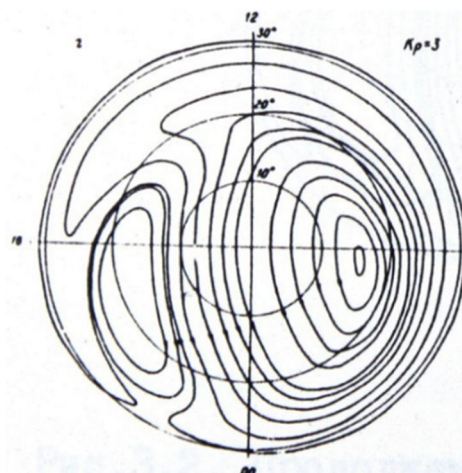


Рис. 2. Двухвихревая картина конвекции с учетом коротации при $Kr=3$. Внешняя широтная граница находится на 30° кошироты

На нижней границе ионосферы (~ 130 км) задается концентрация O^+ из условия фотохимического равновесия, а на верхней – величина потока. Верхняя граница ионосферы выбрана на фиксированной высоте 600 км с заданием граничного условия на поток ионов O^+ . В уравнении (3) учтено образование иона M^+ под действием излучения (корпускулярного, связанного с высыпаниями энергичных частиц из магнитосферы, а также прямого и рассеянного солнечного УФ) и в реакции потерь O^+ . При расчете использован эффективный коэффициент рекомбинации. Параметры термосферы не моделируются внутри ионосферного блока, а задаются на основе известных эмпирических моделей MSIS [4].

Таким образом, в ионосферном блоке при заданных гелиогеофизических условиях, дне года и моменте мирового времени рассчитывается высотное распределение Ne в любом заданном наборе точек на сетке, покрывающей высокоширотную область. При этом на первом этапе осуществляется расчет траекторий конвекции вспять по времени для определения стартовой точки, удаленной настолько, чтобы избежать влияния неопределенности начальных условий на высотный профиль Ne в требуемой точке. Затем вдоль полученной траектории производится численное решение уравнений (2) и (3).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модель позволяет получать высотное распределение Ne в заданной географической точке, а также строить двумерные картины изолиний максимума концентрации. При моделировании можно исследовать эффект, который обусловлен каждым из входных параметров. В качестве примера на рис. 3 представлены изолинии Ne_{max} для условий $B_z < 0$, $B_z = 0$ и $B_z > 0$ при $B_y = 0$.

Эффект ориентации B_z ММП проявляется в изменении общей структуры изолиний Ne_{max} , что является следствием топологически различных типов конвективного дрейфа плазменных трубок под действием электрических полей магнитосферной конвекции. Так, при повороте ММП от юга к северу (рис. 3 слева направо) значения Ne_{max} уменьшаются, изменяется положение и форма языка ионизации, проявляется полярная полость, а полярная стенка ГИП смещается к северу. Можно видеть, что модель достаточно детально описывает крупномасштабные неоднородности полярной ионосферы, где наблюдаются значительные градиенты Ne .

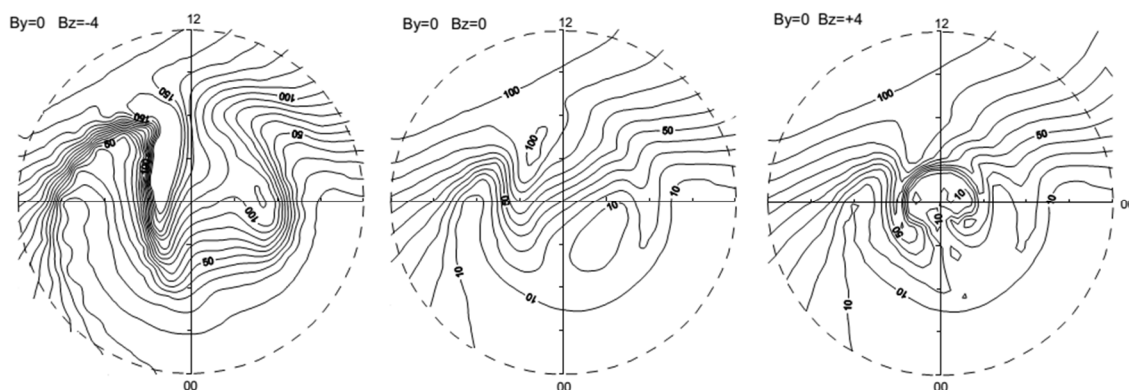


Рис. 3. Карты изолиний $Ne_{max} \cdot 10^{-4}$ (см-3) при (слева направо): $B_z = -4, 0, +4$ нТл; $B_y = 0$. Другие входные параметры: $V_{св} = 400$ км/с, $DOY = 360$, $Kp = 2$, $F10.7 = 150$, $UT = 18$. Карты построены в геомагнитных координатах в области $MLat > 50^\circ$

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

В зависимости от целей и решаемых задач можно выделить два основных направления в теоретическом моделировании ионосферы. Одно из них заключается в разработке глобальных моделей с детальным и по возможности самосогласованным описанием физико-химических процессов. Примером такой модели является модель [5], представляющая собой глобальную численную модель термосферы, ионосферы и протоносферы. В рамках модели предусмотрено полностью самосогласованное описание ионного и нейтрального составов, электрических полей и нейтрального ветра. Проведение расчетов по таким моделям может быть эффективно реализовано на ЭВМ с очень высокой производительностью.

В основе другого подхода к ионосферному моделированию лежит необходимость решения прикладных задач для решения диагностических и прогностических задач ионосферного мониторинга и службы космической погоды. В этом случае теоретическая модель является региональной и учитывает основные, наиболее существенные процессы, тем самым повышая оперативность расчетов. Модель полярной ионосферы, представленная в данной статье, относится ко второму из указанных типов направлений моделирования. Модель реализована в виде пакета программ с простым интерфейсом. Время расчета трехмерной структуры Ne для заданного момента времени < 1 мин на обычном персональном компьютере. При получении текущих значений параметров открывается возможность в квазиреальном времени обеспечить регулярное обновление трехмерной структуры полярной ионосферы. При наличии прямых измерений Ne может быть добавлен блок ассимиляции данных, т.е. текущая коррекция Ne непосредственно по данным ионозондовых измерений, что повышает точность модели.

Список используемых источников

1. Lukianova R., Uvarov V.M., Coisson P. High-latitude F region large-scale ionospheric irregularities under different solar wind and zenith angle conditions // Adv. Space Res. – 2017. – Vol. 59 (2). – P. 557–570. – Doi:10.1016/j.asr.2016.10.010.2017.
2. A top to bottom evaluation of IRI 2007 within the polar cap / D.R. Themens, P.T. Jayachandran, M.J. Nicolls, J.W. MacDougall // J. Geophys. Res. Space Phys. – 2014. – Vol. 119. – P. 6689–6703. – Doi:10.1002/2014JA020052.2014.

3. *Uvarov V.M., Lukianova R.Y.* Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions // *Adv. Space Res.* – 2015. – Vol. 56. – P. 2563–2574. – Doi:10.1016/j.asr.2015.10.004.2015.
4. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / J.M. Picone, A.E. Hedin, D.P. Drob et al. // *Journal Geophysical Research*, 107(A12), 1468, 2002.
5. Numerical modelling of the thermosphere–ionosphere–protonosphere system / A.A. Nangaladze, Y.N. Korenkov, V.V. Klimenko et al. // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 1991. – Vol. 53 (11–12).

А.В. Панчук

Северо-Кавказский Федеральный университет, г. Ставрополь;
Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз.

ПРОГРАММА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ДНЕВНОЙ И НОЧНОЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

С использованием астрономических спектрографов разработан метод определения влагосодержания в ночной и дневной атмосфере Земли.

Ключевые слова: спектры высокого разрешения, моделирование, осажденная вода.

ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопические измерения количества осажденной воды в атмосфере являются наиболее точным методом, обеспеченным сегодня как технически (приборы высокого спектрального разрешения, твердотельные приемники оптического излучения), так и аналитически (базы параметров молекулярных линий, комплексы программ моделирования абсорбционных спектров). Это позволяет сформулировать программу измерений влагосодержания, опираясь преимущественно на возможности астрономической спектральной аппаратуры.

АППАРАТУРА ДЛЯ НОЧНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Астрофизики, наблюдая спектры звезд, одновременно регистрируют и спектры, формируемые в тропосфере и ионосфере Земли. Использование астрономических архивов для получения информации о состоянии земной атмосферы уже рассматривалось в работе [1].

Фотометрические методы определения влагосодержания основаны на дифференциальных измерениях в фильтрах, настроенных на молекулярную полосу и на участок непрерывного спектра рядом с полосой [2]. Такие методы обладают невысокой точностью, главным образом из-за различной реакции спектральных линий на число поглощающих молекул N . Интенсивность слабых молекулярных линий хорошо отражает изменение N . Интенсивность сильных линий слабо растет с изменением N , в основном из-за эффектов насыщения на кривой роста (см. рис. 30 в [3]). В каждой молекулярной полосе находятся как слабые, так и сильные линии, поэтому чувствительность интенсивности любой полосы к изменению N ослаблена.

Спектроскопические методы определения влагосодержания позволяют выделять отдельные вращательные линии в колебательной полосе и проводить анализ только по наиболее чувствительным линиям. Для того чтобы измерять такие слабые вращательные линии, необходимо использовать спектрограф высокого разрешения. Эти спектрографы построены в САО РАН (см., например, в работе [4]). На рис. 1 [5] показан фрагмент спектра звезды, где кроме линий, сформированных в звездной атмосфере, видны многочисленные линии спектра водяного пара.

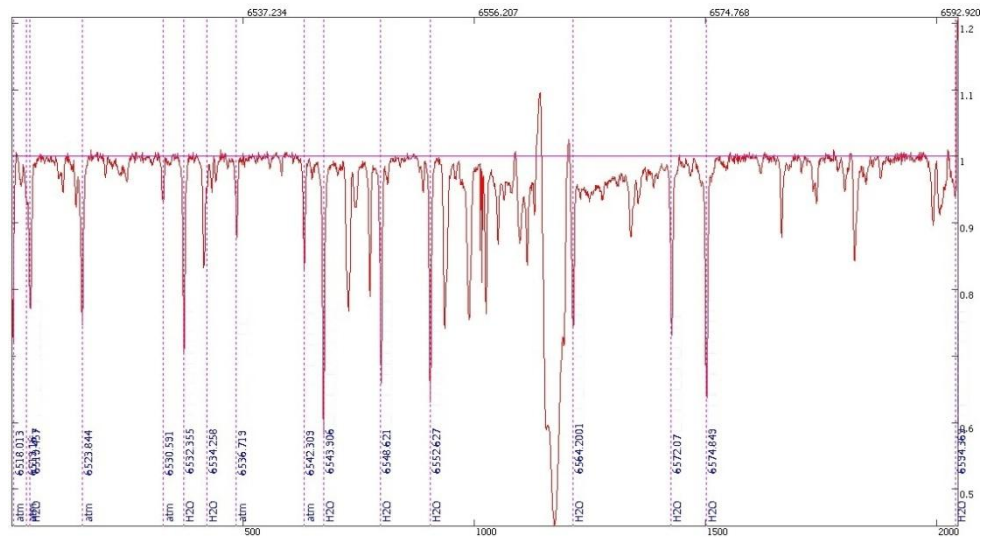


Рис. 1. Фрагмент спектра звезды, полученного на спектрографе [4].
Отмечены линии спектра водяного пара (спектральный интервал 6518–6592 Å)

АППАРАТУРА ДЛЯ ДНЕВНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Итак, ночью астрономы получают спектры водяного пара «попутно», при исследовании спектров небесных объектов. А для измерения спектров дневной атмосферы необходимо наблюдать прямое солнечное излучение. С этой целью следует построить спектрограф, соединенный оптическим волокном с небольшой питающей оптикой. Однако спектральное разрешение «дневного» спектрографа должно быть близким к параметрам «ночного». Поэтому здесь также использована схема скрещенной дисперсии (рис. 2, 3), позволяющая на матрице ПЗС регистрировать набор спектральных порядков, каждый из которых содержит участок интересующего нас спектра (рис. 4). Описание принципа скрещенной дисперсии можно найти в работе [6, с. 159].

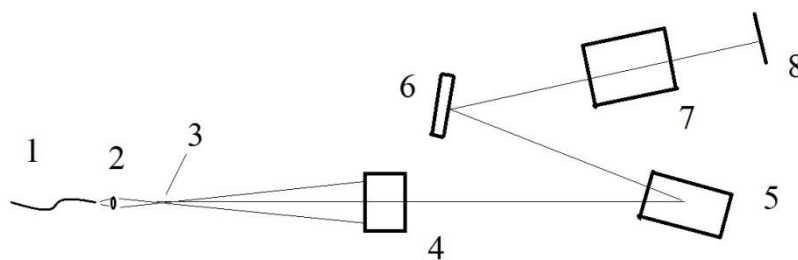


Рис. 2. Схема спектрографа скрещенной дисперсии:
1 – оптическое волокно; 2 – согласующая оптика; 3 – входная щель; 4 – линзовый коллиматор; 5 – дифракционная решетка с большим углом блеска (штрихи параллельны короткой стороне решетки); 6 – решетка скрещенной дисперсии (штрихи перпендикулярны плоскости рисунка); 7 – объектив камеры спектрографа;
8 – площадка приемника (матрицы ПЗС)

Рассмотрим параметры основных оптических элементов изготовленного спектрографа. Линзовый коллиматор (поз. 4 на рис. 2, 3) имеет относительное отверстие 1:10, диаметр коллимированного пучка составит $d = 60$ мм. Решетка-эшелле с большим углом блеска – $\Theta_b = 63,5^\circ$ (поз. 5 на рис. 2, 3), с размерами заштрихованной части 180×120 мм², работает в

схеме автоколлимации (угол падения α равен углу блеска Θ_b и среднему углу дифракции β), работает вне главной плоскости дифракции (случай «с» по классификации работы [7]). Полностью перехватывая коллимированный пучок, решетка-эшелле направляет дифрагированные пучки на решетку скрещенной дисперсии (поз. 6 на рис. 2, 3). Параметры решетки скрещенной дисперсии (работающей в первом порядке дифракции) подобраны таким образом, чтобы на площадке приемника (поз. 8 на рис. 2) размещалось максимальное количество спектральных порядков, формируемых решеткой-эшелле. Линзовый объектив камеры спектрографа (поз. 7 на рис. 2 и 3) с относительным отверстием 1:2 имеет фокусное расстояние $F = 180$ мм.



Рис. 3. Один из этапов сборки основных узлов оптоволоконного спектрографа (обозначения те же, что и на рис. 2)



Рис. 4. Спектр звезды, зарегистрированный на оптоволоконном спектрографе скрещенной дисперсии. Во втором сверху спектральном порядке видны линии колебательно-вращательной полосы спектра молекулы кислорода. В 13-м сверху порядке изображен участок спектра, фотометрический разрез которого соответствует рис. 1

Приемником служит матрица ПЗС с охлаждением на эффекте Пельтье, форматом 2048×2048 элементов (пикселей, каждый размером $0,015 \times 0,015 \text{ мм}^2$). Качество оптики обеспечивает двухпиксельное линейное разрешение на приемнике.

В данном случае, при отношении фокусных расстояний объективов коллиматора и камеры 3,33:1, ширина входной щели спектрографа (поз. 3 на рис. 2) составляет 0,1 мм. Спектральное разрешение $R = \lambda/\delta\lambda = 22500$, где $\delta\lambda$ – ширина аппаратной функции спектрографа. При распространении света по оптическому волокну происходит так называемая деградация апертуры (телесный угол выходящего пучка всегда больше угла входящего пучка). Не останавливаясь на деталях технического решения, отметим только, что для согласования апертуры коллиматора и апертуры пучка, выходящего из оптоволокну, используется согласующая оптика (поз. 2 на рис. 2). На входе в оптическое волокно также установлена оптика (на рис. 2 не показана), согласующая апертуру питающей оптической системы (небольшой телескоп) с числовой апертурой оптического волокна. При оптоволоконном сочетании спектрографа с телескопом малого диаметра ($D = 25 \text{ см}$) можно проводить и ночные измерения, по ярким звездам.

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Кроме баз данных параметров линий атомов и ионов, разработанных астрофизиками для численного моделирования спектров звезд [8], созданы базы параметров молекулярных линий, разработанные для численного моделирования спектров земной атмосферы (например, пакет HITRAN [9]). На рис. 6 показан фрагмент спектра водяного пара, вычисленный при помощи пакета TAPAS [10]. Для определений влагосодержания используем наиболее слабые линии (не глубже 10% от уровня непрерывного спектра).

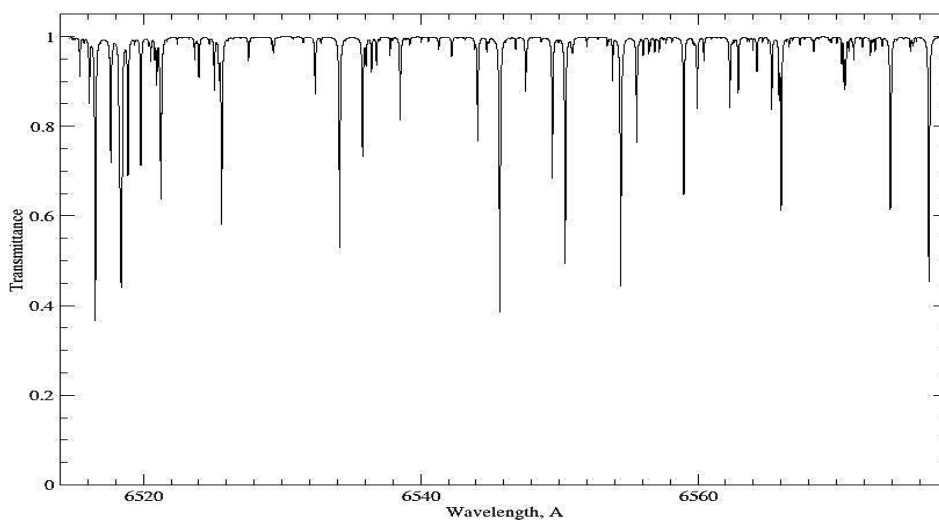


Рис. 5. Теоретический спектр водяного пара, рассчитанный для спектрального интервала 6514–6578 Å (сравни с рис. 1)

Распределение водяного пара с высотой в атмосфере можно изучить, моделируя совокупность спектральных линий, имеющих различную интенсивность. Однако в большинстве прикладных задач достаточно знать интегральную величину содержания водяного пара, т. е. количество осажденной воды ω . Эта величина равна высоте столбика воды с основанием 1 см^2 , содержащего столько молекул H_2O , сколько их находится в вертикальном столбе воздуха (сечением 1 см^2). Для сравнения величин ω , полученных при наблюдениях на различ-

ных наклонных трассах, все результаты пересчитываются на вертикальный столб. Сухая атмосфера высокогорья (4 км и более) характеризуется величиной ω : 1 мм [11] – это предел возможностей измерений при помощи интерференционных фильтров.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изложенный метод опирается на развитую инфраструктуру астрономических обсерваторий и других учреждений. Однако в связи с необходимостью поиска и детальных исследований наиболее сухих мест высокогорья, пригодных для наблюдений в дальнем инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах, необходимо разработать достаточно мобильную и точную оптическую аппаратуру. Определяя содержание осажденной воды по отдельным линиям и молекулярным полосам в красном и ближнем ИК диапазонах, можно уверенно рассчитать прозрачность атмосферы в дальнем ИК и субмиллиметровом диапазонах. Мы рассматриваем два варианта оптической аппаратуры для экспедиционных наблюдений.

В первом (фильтровом) варианте предлагается использовать небольшой оптический телескоп ($D = 25$ см), входная апертура которого перекрыта крышкой с четырьмя отверстиями одинаковой площади. В каждом отверстии установлен интерференционный фильтр. Первая пара фильтров (центральные длины волн $\lambda_c = 0,98$ и $\lambda_c = 0,88$ мкм) ориентирована, соответственно, на полосу поглощения водяного пара (протяженностью от 0,89 до 1,00 мкм) и полосу соседнего участка непрерывного спектра. Вторая пара фильтров ($\lambda_c = 1,13$; $\lambda_c = 1,05$ мкм) ориентирована на измерения поглощения в полосе водяного пара (протяженностью от 1,09 до 1,2 мкм). Как показали наблюдения, первая пара фильтров пригодна для измерений средних значений ω , когда полоса 1,09–1,2 мкм является насыщенной и уже слабо чувствует изменения ω . Вторая пара фильтров является оптимальной для измерений малых значений ω . Если под оправами интерференционных фильтров разместить клиновидные пластины с очень малым углом отклонения, в фокальной плоскости телескопа вместо одного изображения звезды получим четыре изображения, сформированные в четырех указанных спектральных полосах. Измеряя интенсивности каждого изображения, получим соотношения потоков в каждой паре полос. Такой метод должен быть откалиброван спектроскопически.

Второй (спектральный) вариант предусмотрен для дневных измерений, по спектру Солнца. Решетка-эшелле работает без элемента скрещенной дисперсии, необходимый для измерений спектральный порядок выделяется интерференционным фильтром, ширина полосы которого равна длине избранного порядка. В нашей конструкции мы используем небольшую решетку-эшелле (размер заштрихованной области 60 x 30 мм²). Рабочий спектральный порядок, сопоставимый с рис. 1, выделяется интерференционным фильтром (ширина полосы 40 Å, $\lambda_c = 6590$ Å). Габариты питающей оптики минимальны. При таком решении масса экспедиционного спектрографа оказалась сравнимой с массой приемника и штатива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный метод может получить следующие приложения:

- а) изучение суточной циркуляции водяного пара над обсерваторией;
- б) калибровка других методов (работающих в инфракрасном и субмиллиметровом диапазоне);
- в) разработка экспедиционных средств в программе поиска мест для телескопа субмиллиметрового диапазона;
- г) определение «влажной», или тропосферной задержки микроволнового сигнала в системах глобального позиционирования;

д) выделение слабых астрономических сигналов в участках спектров, перегруженных линиями водяного пара атмосферы Земли.

Благодарим профессора СКФУ **Р.Г. Закияна** за полезные консультации.

Примечание. Материалы о разработанных и разрабатываемых конструкциях планируем опубликовать отдельно.

Список используемых источников

1. *Panchuk V.E., Tavalzhanskaya N.S., Chepizhko A.V.* Monitoring of Earth's atmosphere by astrophysical means // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* – 1996. – Vol. 41. – P. 154–166.
2. Изучение влагосодержания и прозрачности дневной атмосферы в районе БТА / Ю.К. Бергнер, А.В. Крат, С.М. Морозова и др. // *Астрофизические исследования (Известия САО АН СССР)*. – 1978. – Т. 10. – С. 52–60.
3. Теоретическая астрофизика / В.А. Амбарцумян, Э.Р. Мустель, А.Б. Северный, В.В. Соболев; под ред. В.А. Амбарцумяна. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952. – 635 с.
4. *Panchuk V. E., Klochova V. G., Yushkin M. V.* The high-resolution Echelle Spectrograph of the 6-m telescope of the special astrophysical observatory // *Astronomy Reports*. – 2017. – Vol. 61, is. 9. – P. 820–831. – Doi: 10.1134/S1063772917080091.
5. *Закиян Р.Г., Панчук А.В.* Определение осажденной воды по оптическим спектрам // Сборник научных трудов международной конференции «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», г. Ставрополь, 24–28 сентября 2018 г. – Ставрополь, 2018. – С. 98–100.
6. *Тарасов К.И.* Спектральные приборы. – Л.: Машиностроение, 1968. – 387 с.
7. *Schroeder D.J. and Hilliard R.L.* Echelle efficiencies: theory and experiment // *Applied Optics*. – 1980. – Vol. 19, is. 16. – P. 2833–2841. – Doi: 10.1364/AO.19.002833.
8. VALD: The Vienna Atomic Line Data Base / N.E. Piskunov, F. Kupka, T.A. Ryabchikova et al. // *Astronomy and Astrophysics Suppl. Ser.* – 1995. – Vol. 112. – P. 525–535.
9. The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database / I.E. Gordon, I.E. Rothman, C. Hill et al. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2017. – Vol. 203. – P. 3–69.
10. TAPAS, a web-based service of atmospheric transmission computation for astronomy / J.L. Bertaux, R. Lallement, S. Ferron et al. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2014. – Vol. 564, id. A46. – P. 12. – Doi: 10.1051/0004-6361/201322383.
11. A comparative evaluation of astronomical-climatic conditions for infrared astronomical observations in some high-mountain regions / Y.K. Bergner, V.M. Voropaev, A.V. Krat, M.A. Pogodi // *Soviet Astronomy*. – 1978. – Vol. 22. – P. 510–513.

В.М. Петроченко*,

кандидат технических наук, доцент;

В.Н. Шулейкин**,

доктор физико-математических наук;

Г.Г. Щукин*,

доктор физико-математических наук, профессор

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

** Институт проблем нефти и газа, г. Москва.

УЧЕТ ШУМОВЫХ ВЛИЯНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ И АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И ЗОН ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Представлены связи атмосферного электрического поля и полярных проводимостей воздуха с относительной влажностью воздуха и атмосферным давлением. Их непрерывный контроль при решении задач атмосферно-электрического мониторинга геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов повысит помехозащищенность результата.

Ключевые слова: атмосферное электрическое поле, полярные проводимости, относительная влажность воздуха, атмосферное давление.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексные газовые и атмосферно-электрические наблюдения позволили построить модельное представление связей газовых и электрических полей Земли и атмосферы. Пузырьковые образования водорода и метана захватывают почвенный радон с глубин 4–6 м и выносят его в приповерхностную атмосферу, где ионизация приводит к образованию легких и тяжелых ионов, ответственных за полярные проводимости (ПП) воздуха и атмосферное электрическое поле (АЭП). Другими словами, результаты профильных наблюдений атмосферного электрического поля, АЭП и полярных проводимостей, ПП воздуха можно использовать для решения задач прикладной геофизики [1–3].

Долгое время мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов осуществлялся исключительно в условиях «хорошей погоды»: скорость ветра – не более 6 м/с, отсутствие грозových явлений, всякого рода осадков, инея, тумана, пыли, нижней облачности [4, 5].

Все перечисленные изменения метеорологической ситуации определяются визуально. Однако практика полевых измерений выявила еще ряд метеорологических факторов, которые требуют аппаратного контроля для повышения точности атмосферно-электрических и водород-радоновых наблюдений. Рассмотрим примеры влияния внешне незаметных шумовых вариаций метеорологической ситуации на элементы приземного электричества.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ШУМОВЫХ ВАРИАЦИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ЭЛЕМЕНТЫ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В результате режимных наблюдений вертикального тока проводимости в сейсмоактивном регионе (Туркмения) при решении прогнозных задач была установлена связь контролируе-

мого параметра, АЭП с относительной влажностью воздуха. Для сглаживания суточных вариаций тока была предложена разностная характеристика его измеренных величин и расчетных значений, построенных как функция относительной влажности.

В районе Озернинского водохранилища летом 1990-го велась непрерывная запись АЭП двумя флюксометрами, установленными на суше в 100 м от береговой линии и на понтоне, на удалении 300 м от берега. При рассмотрении разности усредненной часовой вариации поля, зарегистрированного над водой и на суше, выделялся устойчивый максимум ~ 70 В/м между 7 и 9 часами утра. В это время над акваторией практически ежедневно появлялась слабая дымка – продукт испарения с водной поверхности. Другими словами, имела место инжекция нейтральных ядер конденсации, которая и приводила к росту АЭП над водой.

Двухдневный комплексный контроль плотности ядер конденсации N (первые сотни – 4500 ядер в см^{-3}), АЭП, E на горе Цугшитце (Северные Альпы) [6] привел к тому, что коэффициенты корреляции между измеренными и расчетными значениями поля для первого и второго дня были равны:

$$k_1[E_1(t); E(N_1)] = 0,80; k_2[E_2(t); E(N_2)] = 0,95.$$

Дополнительные оценки показали, что связи между измеренными значениями поля, относительной влажностью q и плотностью ядер конденсации N тоже очень велики – коэффициенты корреляции были равны:

$$k_1[E_1(t); q_1] = 0,90; k_1[E_1(t); N_1] = 0,72 \text{ – для первого дня наблюдений;} \\ k_2[E_2(t); q_2] = 0,98; k_2[E_2(t); N_2] = 0,93; k_2[E_2(t); q_2] = 0,98; k_2[E_2(t); N_2] = 0,93 \text{ – для второго дня наблюдений.}$$

Относительная влажность воздуха является показателем процесса испарения в атмосфере, т. е. показателем инжекции в воздух нейтральных ядер конденсации, определяющих плотность тяжелых ионов, несущих основную «ответственность» за АЭП. В ряде задач ее параллельный контроль позволяет сгладить суточные вариации поля. В противном случае необходимо исключить из рассмотрения временные интервалы ее интенсивного изменения, например временные промежутки испарения росы при солнечном прогреве.

Проиллюстрируем сделанные выводы примером. Наблюдения АЭП, E и относительной влажности воздуха q велись в условиях «хорошей погоды». Во временной интервал $10^h 10^m - 10^h 30^m$ за счет солнечного прогрева пошло интенсивное высыхание росы – значения относительной влажности менялись в широком диапазоне значений 43%, 65%, 95%, 55% (Ставропольский край, х. Усть-Невинский, июнь 2006 года). В процессе испарения инжекция в воздух нейтральных ядер конденсации практически в 2 раза увеличила АЭП. По результатам измерений была построена линейная аппроксимация поля как функция относительной влажности $E(q)$ и рассчитана разность измеренных и расчетных значений АЭП, которая суммировалась со средним значением поля на период наблюдений: $E_{\text{ср}} + [E - E(q)]$. Временные вариации этой суммарной функции существенно меньше, чем вариации измеренных значений поля; для повышения достоверности результата очевидна целесообразность исключения данных измерений за временной интервал $10^h 10^m - 10^h 30^m$ (рис. 1).

Значения АЭП достаточно стабильны до и после временного интервала $10^h 10^m - 10^h 30^m$. Средние значения поля с $10^h 30^m$ на величину ~ 35 В/м меньше, что понятно с физической точки зрения. Процесс испарения влаги с поверхности земли и приповерхностного парового пространства интенсифицирует воздухообмен почва – атмосфера и, как следствие, эксхалацию почвенного радона.

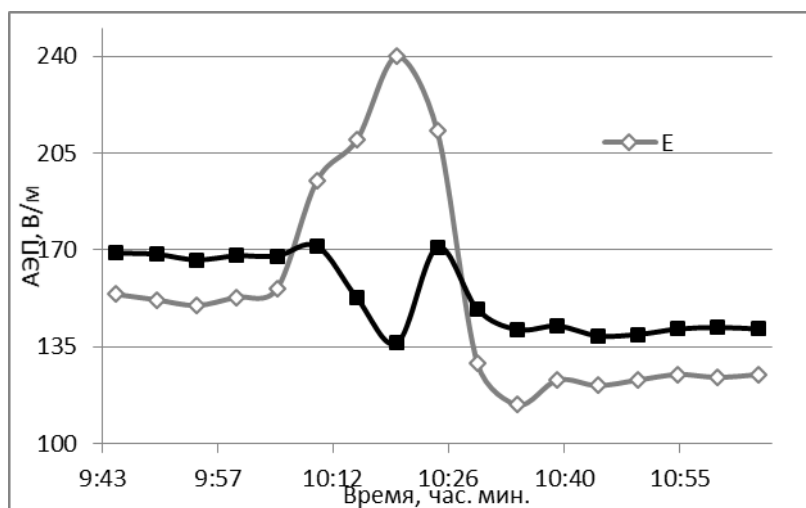


Рис. 1. Измеренные E и расчетные значения АЭП как функции относительной влажности $E_{\text{ср}} + [E - E(q)]$

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НА АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ПОЛЯРНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ ШУМОВЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

При прохождении кучево-дождевого облака и при морозящем дожде записи вертикального тока проводимости $j(t)$ и уровня воды в наблюдательной скважине $z(t)$, вскрывающей водонапорный горизонт (глубина ~ 110 м), варьировали в противофазе [7]. Запись измеренных значений вертикального тока проводимости и расчетных величин тока, построенных как функция изменений уровня воды в наблюдательной скважине – $j(z)$, представлена на рис. 2; коэффициент корреляции при этом составил $k[j(t), j(z)] = 0,92$.

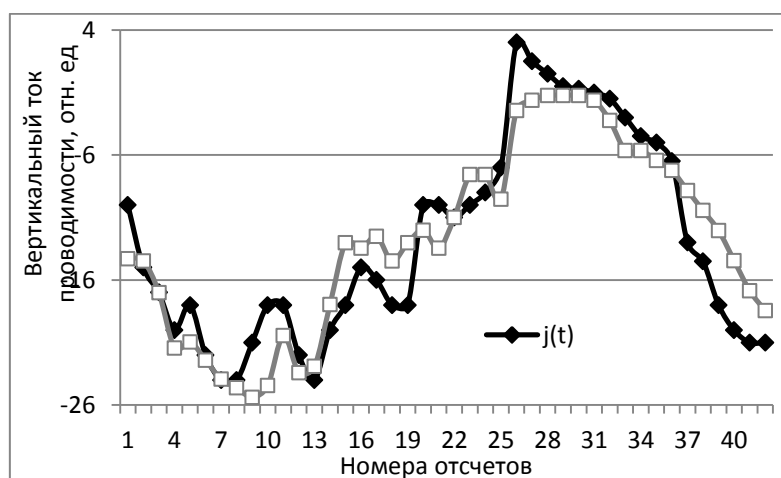


Рис. 2. Измеренные $j(t)$ и расчетные $j(z)$ значения вертикального тока проводимости

В первом случае рост $z(t)$ при прохождении кучево-дождевого облака составил величину ~ 3 мм; при мороси уровень варьировал в пределах 0–3 мм. Аналогичные связи наблюдаются между измеренными значениями АЭП и расчетными величинами поля как функции уровня воды в наблюдательной скважине: $k = [E(t), E(z)]_{\text{гроза}} = 0,98$, $k = [E(t), E(z)]_{\text{морось}} = 0,91$.

Падение и вариации уровней водоносных горизонтов определяются атмосферным давлением. Падение давления вызывает рост уровней, увеличение давления – спад. Максимальной чувствительностью к изменениям давления будут обладать грунтовые воды и верховодка ~ 8 мм/гПа; в водонапорных пластах, изолированных от атмосферы, она существенно меньше. В рассматриваемом случае на зарегистрированные изменения атмосферно-электрических параметров влияли синфазные с зарегистрированным $j(t)$ и $E(t)$ вариации грунтовых вод, стоящих на площади установки измерительных инструментов на глубине $\sim 0,8$ м.

Исходя из критериев «хорошей погоды», при прохождении грозового фронта и при мороси не имеет смысла проводить атмосферно-электрические и водород-радоновые наблюдения. Однако изменение давления можно ожидать при смене атмосферных фронтов или во второй половине дня, когда по статистике наблюдается минимум атмосферного давления и максимум эксхалляции почвенного радона.

На рис. 3 представлены измеренные значения АЭП, E и расчетные значения поля $E_{\text{ср}} + [E - E(P)]$, скорректированные в соответствии с вариациями атмосферного давления P (вариации давления $\sim 0,6$ гПа); достоверность аппроксимации $E(P)$ $D = 0,88$. При необходимости повышения достоверности результата данные измерений в 21 час целесообразно исключить из рассмотрения.

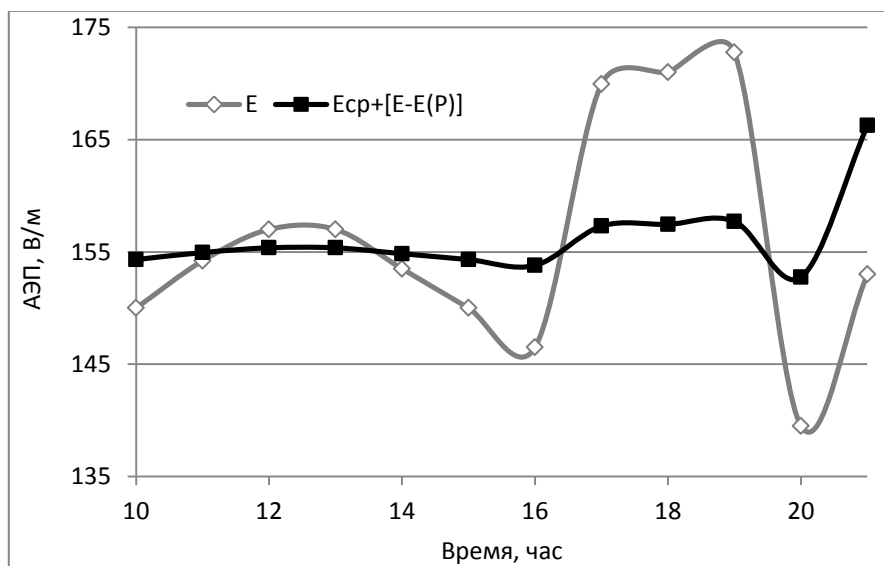


Рис. 3. Измеренные E и расчетные значения АЭП как функции атмосферного давления $E_{\text{ср}} + [E - E(P)]$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Относительная влажность и атмосферное давление относятся к числу легко измеримых метеорологических характеристик атмосферы. Их непрерывный контроль и учет при реше-

нии задач атмосферно-электрического мониторинга геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов смогут повысить точность измерения характеристик электрического поля атмосферы.

Список используемых источников

1. 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.: ЦОП РГГМУ, 2015. – 206 с.
2. Петроченко В.М., Шулейкин В.Н., Шукин Г.Г. Использование атмосферного электрического поля при решении прикладных геофизических задач // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – № 662. – С. 176–180.
3. Shuleikin V.N. Earth and atmospheric electricity // Nova science publishers. – New York, 2018. – 143 p.
4. Руководство по наземным наблюдениям за элементами атмосферного электричества. – Л.: ГГО им. А.И. Воейкова, 1960. – 95 с.
5. Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физических наук. – 1962. – Вып. 4. – С. 593–642.
6. Стыро Б.И. Вопросы ядерной метеорологии. – Вильнюс, 1959. – 418 с.
7. Shuleikin V.N., Shchukin G.G. Interrelations between the Atmospheric Electric Field, Air Pressure, and Hydrogeological Processes // Russian Meteorology and Hydrology. – 2017. – Vol. 42, № 1. – P. 19–26.

И.Н. Ростокин*,

доктор технических наук, доцент;

Е.А. Ростокينا*,

кандидат технических наук, доцент;

Е.В. Федосеева*,

доктор технических наук, доцент;

Г.Г. Шукин**,

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.

КАЛИБРОВКА СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО РАДИОТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ АТМОСФЕРЫ

В статье рассмотрены условия реализации калибровки СВЧ радиометрической системы с компенсацией влияния фоновых шумов по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы. Представлены результаты угломестных измерений радиотеплового излучения атмосферы, по данным которых произведены расчеты параметров калибровки системы для различных углов места без компенсации (по сигналу основного измерительного канала) и с компенсацией влияния фоновых шумов (по разностному выходному сигналу системы).

Ключевые слова: СВЧ радиометрическая система, калибровка по радиотепловому излучению атмосферы, компенсация фоновых шумов.

ВВЕДЕНИЕ

СВЧ радиометрическое зондирование позволяет оперативно отслеживать состояние атмосферы, оценивать значения ее метеопараметров – температуры, влагозапаса, водозапаса облаков и интенсивности осадков – в непрерывном режиме наблюдения [1, 2].

Определение численных оценок метеопараметров атмосферы на основе данных СВЧ радиометрических измерений предполагает решение обратных задач при использовании полуэмпирических моделей взаимосвязи метеопараметров и радиояркостной температуры, поэтому необходимо получение однозначного соответствия величины выходного напряжения системы измеряемой радиояркостной температуре исследуемой области, т. е. выполнение калибровки системы.

Исходя из требования мобильности систем СВЧ радиометрического зондирования атмосферы без привязки к определенному стационарному местоположению, возникают ограничения на возможность реализации известных подходов к калибровке с внешним калиброванным источником радиотеплового излучения при базировании систем на специально организованных измерительных полигонах [3]. В таких условиях одним из возможных вариантов полной калибровки системы, включая антенну, является реализация способа, основанного на угломестных измерениях радиотеплового излучения безоблачной атмосферы [4].

В данной статье рассматриваются вопросы калибровки трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией влияния фоновых шумов по излучению безоблачной атмосферы.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛОМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТРЕХДИАПАЗОННОЙ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ШУМОВ

Выполнение измерений радиотеплового излучения атмосферы СВЧ радиометрическими системами при существенно различных углах места сопряжено с изменением вклада принимаемых по области рассеяния диаграммы направленности (ДН) антенны фоновых шумов – радиотеплового излучения всего окружающего систему пространства. Это обусловлено в основном изменением взаимного расположения подстилающей поверхности и неизотропной части области рассеяния ДН антенны, особенно при малых значениях угла места и широкой ДН [5].

Для уменьшения влияния фоновых шумов была предложена компенсация их вклада в выходной сигнал системы при формировании дополнительного сигнала на выходе антенны, работающей на прием на двух модах круглого волновода, с последующей реализацией нахождения разности выходных сигналов основного и дополнительного антенных каналов [6].

В разработанной трехдиапазонной СВЧ радиометрической системе прием осуществляется на общую апертуру антенны с последовательным выделением сигналов в трех приемных блоках с формированием массива данных значений выходных сигналов при приеме по основным и дополнительным антенным каналам [7, 8].

Прием по двум антенным каналам – основному и дополнительному – в каждом частотном диапазоне характеризуется разными коэффициентами передачи, что требует обязательной калибровки СВЧ радиометрической системы в каждом частотном диапазоне. Реализация угломестных измерений при решении задачи построения высотных профилей метеопараметров и угломестного сканирования в целях обнаружения опасных атмосферных явлений определяет необходимость калибровки системы по разностному выходному сигналу.

ПРИНЦИПЫ КАЛИБРОВКИ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО РАДИОТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ АТМОСФЕРЫ

При калибровке СВЧ радиометрической системы должно быть получено выражение, определяющее соответствие величины выходного сигнала СВЧ радиометрической системы $U_{\text{вых}}$ измеряемой радиояркой температуре $T_{\text{ярк}}$. Взаимосвязь этих величин имеет линейный вид [1]

$$U_{\text{вых}} = S \cdot T_{\text{ярк}} + U_0, \quad (1)$$

где S – крутизна приемника СВЧ радиометрической системы;

U_0 – начало отсчета шкалы приемника.

В процессе калибровки должны быть найдены численные значения двух параметров S и U_0 , поэтому должны быть проведены измерения для двух известных значений радиояркой температуры.

В основе калибровки СВЧ радиометрической системы по радиотепловому излучению атмосферы предположение о ее горизонтальной однородности, которое позволяет принять зависимость радиояркой температуры атмосферы от угла места θ в виде [3]

$$T(\theta_{\text{ярк}}) = T_{\text{яркзен}} / \sin \theta, \quad (2)$$

где $T_{\text{яркзен}}$ – радиояркая температура атмосферы в зените.

Зависимость (1) позволяет при наличии известной величины радиояркой температуры атмосферы в направлении в зенит $T_{\text{яркзен}}$, измеренной или рассчитанной по известным моделям взаимосвязи со значениями температуры и влажности приземного слоя, рассчитать

второе необходимое для калибровки значение радиояркостной температуры для углового направления, отличного от направления в зенит.

УГЛОМЕСТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ШУМОВ

Для оценки возможности выполнения калибровки мобильной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы были выполнены измерения при разных углах места от 5° до 70° в трех рабочих частотных диапазонах с формированием дополнительных выходных сигналов компенсации для измерений на длинах волн 3,2 и 7,5 см. Диапазон углов места был определен реальными условиями базирования СВЧ радиометрической системы в жилом поселении, что отвечает возможным ограничениям для мобильных систем.

Результаты измерений радиотеплового излучения атмосферы в значениях выходных сигналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы при приеме по основным и дополнительным каналам представлены на рис. 1.

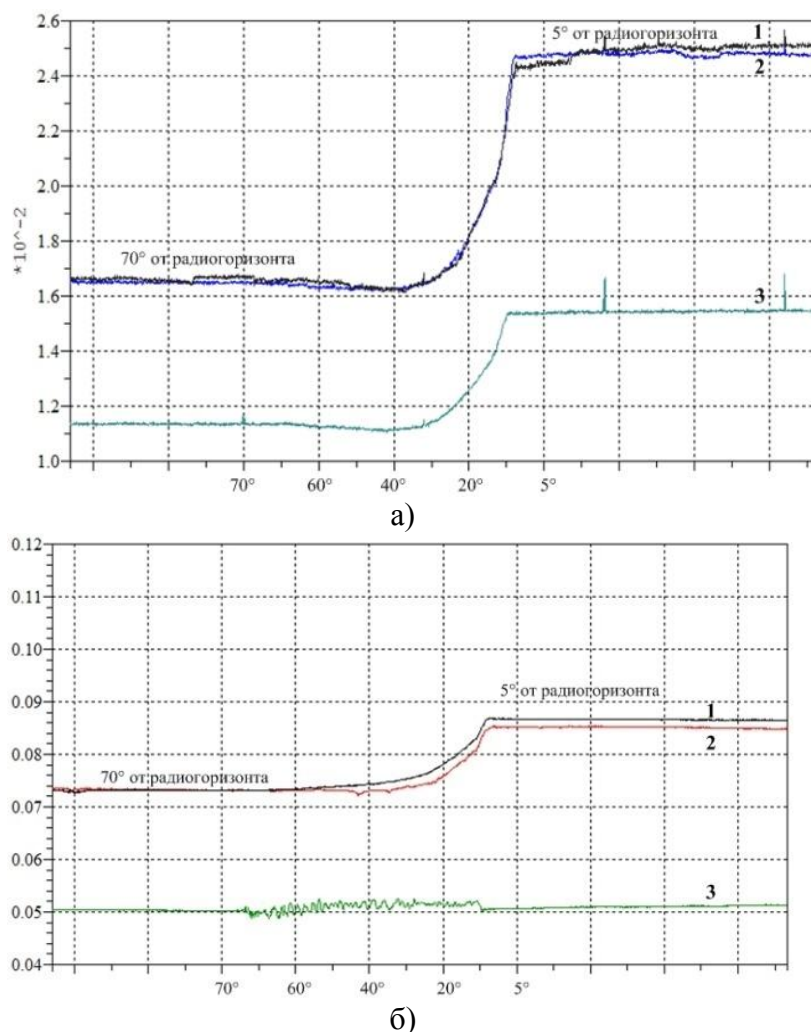


Рис. 1. Выходные сигналы СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов при угломестных измерениях радиотеплового излучения безоблачной атмосферы (24.03.2017 г. 09:05:19 ясное небо, $H=90\%$, $T=+3^\circ\text{C}$) от 70° до 5° к радиогоризонту: 1 – ОСН ВЕРТ; 2 – ОСН ГОР; 3 – ДОП на длине волн: 7,5 см (а), 3,2 см (б), 1,35 см (в)[начало]

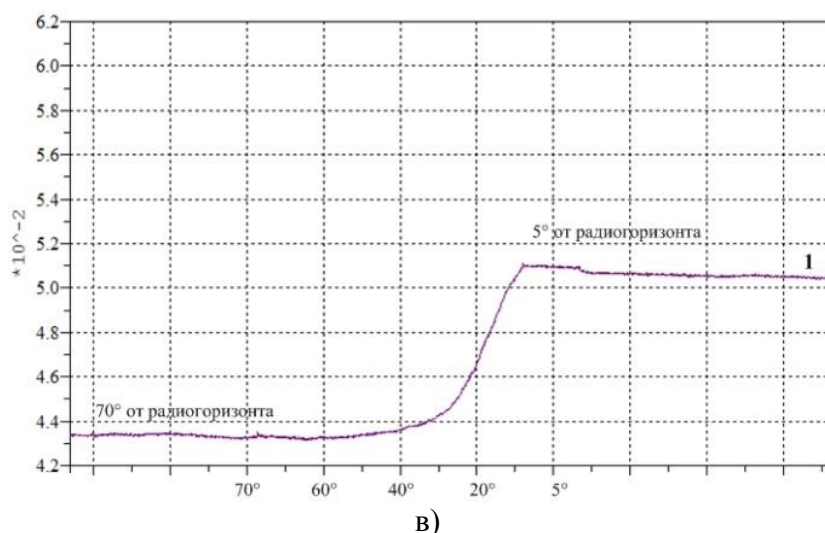


Рис. 1. Выходные сигналы СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов при угломестных измерениях радиотеплового излучения безоблачной атмосферы (24.03.2017 г. 09:05:19 ясное небо, $H=90\%$, $T=+3^{\circ}\text{C}$) от 70° до 5° к радиогоризонту: 1 – ОСН ВЕРТ; 2 – ОСН ГОР; 3 – ДОП на длине волны: 7,5 см (а), 3,2 см (б), 1,35 см (в) [окончание]

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ КАЛИБРОВКИ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ШУМОВ ПО РАДИОТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ АТМОСФЕРЫ

Выполнение угломестных измерений радиотеплового излучения атмосферы СВЧ радиометрической системой в ограниченном угловом секторе, в частности при углах места от 70° до 5° , обусловило необходимость преобразования алгоритма вычисления параметров калибровки S и U_0 по измеренным значениям выходного сигнала $U_{\text{вых1}}$ и $U_{\text{вых2}}$ для двух углов места θ_1 и θ_2 , отличных от зенита, с учетом известного соотношения для радиояркостной температуры атмосферы (2). Параметр S по данным измерений вычисляется по формуле

$$S = \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{T_{\text{ярк1}} - T_{\text{ярк2}}} = \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{T_{\text{яркзен}} \left(\frac{1}{\sin \theta_1} - \frac{1}{\sin \theta_2} \right)} = K_s T_{\text{яркзен}}^{-1}, \quad (3)$$

$$K_s = \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{\left(\frac{1}{\sin \theta_1} - \frac{1}{\sin \theta_2} \right)}, \quad (4)$$

где $T_{\text{ярк1}}$ и $T_{\text{ярк2}}$ – радиояркостные температуры атмосферы для углов места θ_1 и θ_2 ;

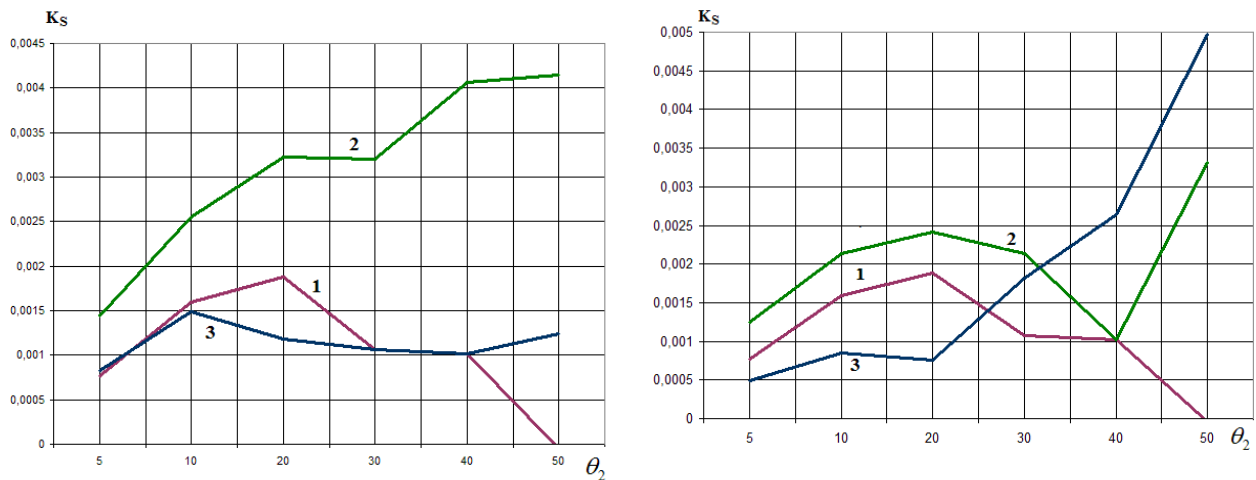
K_s – параметр, задаваемый значениями выходных сигналов СВЧ радиометрической системы и комбинацией углов места θ_1 и θ_2 .

Параметр U_0 по данным измерений определяется по выражению

$$U_0 = U_{\text{вых1}} - \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{T_{\text{ярк1}} - T_{\text{ярк2}}} T_{\text{ярк1}} = \frac{U_{\text{вых1}} \cdot \sin \theta_1 + U_{\text{вых2}} \cdot \sin \theta_2}{\sin \theta_2 - \sin \theta_1}. \quad (5)$$

Для данных измерений радиотеплового излучения безоблачной атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов (рис. 1) были выполнены расчеты параметров K_s и U_0 для режимов с компенсацией и без компенсации

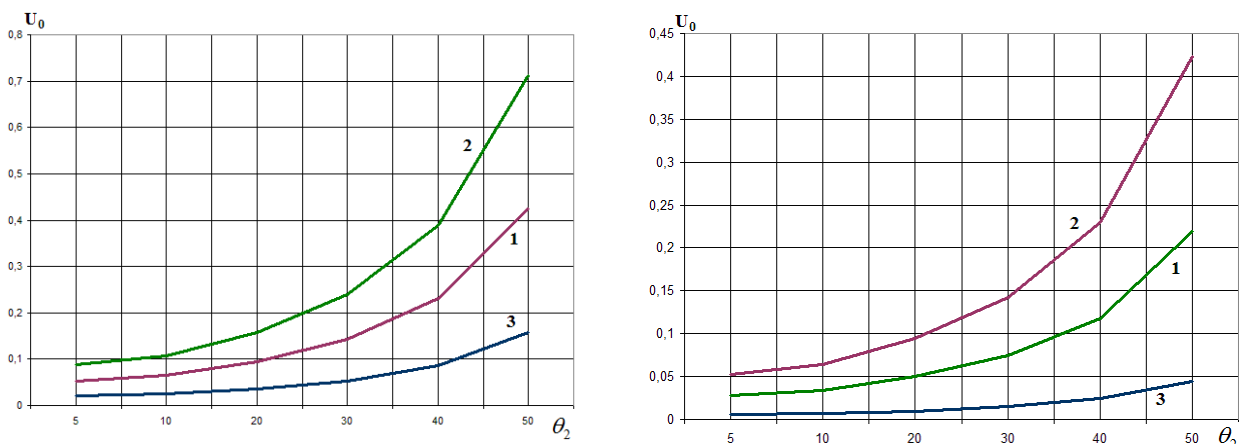
фоновых шумов. В качестве θ_1 принят угол места 70° , а в качестве θ_2 рассматривались возможные значения от 5 до 50° . Результаты расчетов показаны на рис. 2 и 3.



а)

б)

Рис. 2. Зависимость параметра K_s от выбора угла θ_2 для частотного диапазона с длиной волны 1,35 см (1), 3,2 см (2), 7,5 см (3) в режимах без компенсации (а) и с компенсацией (б) фоновых шумов



а)

б)

Рис. 3. Зависимость параметра U_0 от выбора угла θ_2 для частотного диапазона с длиной волны 1,35 см (1), 3,2 см (2), 7,5 см (3) в режимах без компенсации (а) и с компенсацией (б) фоновых шумов

Анализ полученных результатов расчета параметров калибровки СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов по данным измерений радиотеплового излучения безоблачной атмосферы показал следующее:

- параметр K_s , характеризующий крутизну шкалы приемника, существенно зависит от выбора дополнительного углового направления θ_2 , причем характер изменения его значения оказывается разнонаправленным, но выполнение компенсации фоновых шумов, т. е. калибровка по разностному сигналу, показывает меньший разброс его значений, особенно для канала с длиной волны 3,2 см;

– наименьший диапазон изменения значений параметра K_s в СВЧ радиометрической системе с компенсацией фоновых шумов для всех трех частотных диапазонов имеет место для углов θ_2 от 10 до 30 °;

– параметр U_0 имеет одинаковый характер изменения от угла θ_2 для случая системы без компенсации и с компенсацией фоновых шумов: значение растет при увеличении угла места θ_2 , но в системе с компенсацией размаха изменения U_0 при одном и том же диапазоне углов θ_2 практически в 2 раза меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов угломестных измерений радиотеплового излучения безоблачной атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой с компенсацией фоновых шумов с позиции оценки возможности оперативной ее калибровки в условиях оперативного изменения места базирования показал возможность выполнения калибровки по разностному выходному сигналу системы для трех частотных каналов с предварительной оценкой оптимальности выбора дополнительного направления θ_2 приема излучения атмосферы.

Данная процедура – калибровка по радиотепловому излучению безоблачной атмосферы может быть рекомендована для проверки правильности функционирования системы при изменении условий проведения СВЧ радиометрических измерений как дополнительная к исходной ее калибровке в условиях измерительного полигона.

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. Yong Han, Westwater Ed R. Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – Vol. 38, № 3. – P. 1260–1276.

4. / G. Mashwitz, U. Lohnert, S. Crewell, T. Rose and D.D. Turner // Turner Atmospheric Measurement Techniques. – 2013. – № 6. – P. 2641–2658. – Doi: 10.5194/atm-6-2641-2013.

5. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех: моногр. – Муром: Издательско-полиграфический центр Муромского ин-та ВлГУ, 2012. – 103 с.

6. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростокина // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – №1(13). – С. 50–62.

7. Fedoseeva E.V. An estimate of the error of measurements of radio brightness temperature in radioheat location systems for monitoring meteorological parameters with background noise compensation // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 57, № 12. – P. 1463–1468.

8. Multifrequency microwave radiometric method of detection and control of dangerous atmospheric weather events, resistant to changing measurement conditions / I. Rostokin, E. Fedoseeva, E. Rostokina, G. Shchukin // Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia, 1–6 July 2019. – Doi: 10.1109/RWP.2019.8810166.

В.В. Семёнов

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

МОДЕЛЬ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ «СМОТРЯЩЕГО» ТИПА В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 8–12 МКМ

Современные оптико-электронные системы имеют функциональные ограничения, связанные с поглощением и рассеянием электромагнитного излучения атмосферой. Для качественной работы таких систем необходимо оценивать влияние атмосферы через ее характеристики, основной из которых является прозрачность атмосферы. В работе рассматривается модель молекулярного поглощения водяным паром электромагнитного излучения для тепловизионных систем «смотрящего» типа, функционирующих на приземных трассах в диапазоне длин волн 8–12 мкм.

Ключевые слова: прозрачность атмосферы, коэффициент прозрачности атмосферы, тепловизионная система, молекулярное поглощение, аэрозольное ослабление.

ВВЕДЕНИЕ

К оптико-электронным системам относятся такие системы, с помощью которых сведения о размерах, форме, положении и энергетическом состоянии тела, содержащиеся в потоке излучения, извлекаются путем его специальной обработки и преобразования в электрический сигнал с последующим выделением его из шумов и регистрацией. К одному из типов оптико-электронных систем относятся тепловизионные системы «смотрящего» типа (ТПВС).

Данные системы принимают сигналы в инфракрасной области спектра, обладают высоким пространственным и энергетическим разрешением, имеют малый уровень собственных шумов, высокое быстродействие. Работают такие системы на основе матричных чувствительных элементов – приемников электромагнитного излучения. К ним относятся системы наблюдения (бинокли, монокуляры), тепловизионные камеры, системы дистанционного зондирования Земли, системы обнаружения, наведения и др.

Постоянное развитие и перспективность ТПВС во многом объясняется тем, что именно в инфракрасной области спектра сосредоточена основная доля собственного электромагнитного излучения большинства окружающих нас объектов искусственного и естественного происхождения [1]. Основное назначение – это обнаружение различных объектов, часто в сложных метеорологических условиях, при ведении экологического мониторинга, в спасательных операциях, при навигации летательных аппаратов и т.п.

Главным ограничением для эффективного функционирования тепловизионных систем является земная атмосфера, что на практике стало предметом планирования применения их в различных климатических условиях и в разное время суток.

В данной публикации рассматривается модель, которая обеспечивает получение значений коэффициента поглощения водяным паром $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ для различных ее состояний и времени суток в заданном районе для ТПВС в спектральном диапазоне 8–12 мкм. Выбранный диапазон обусловлен тем, что по результатам экспериментальных исследований различных авторов [1, 4, 5, 7, 8] подтверждено преимущество этого диапазона перед остальными в пропускании инфракрасного сигнала на трассах до 20 км при наличии различных шумов в среде распространения.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Известно, что для заданной длины волны λ в оптически однородном слое атмосферы толщиной $l = 1$ км общее ослабление монохроматического излучения описывается законом Бугера – Ламберта – Бера [1, 6, 9–12]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-k(\lambda)l},$$

где $I_0(\lambda), I(\lambda)$ – интенсивность излучения соответственно до и после прохождения слоя среды толщиной l ;

$k(\lambda)$ – показатель ослабления, зависящий от длины волны.

Откуда

$$\tau_0 = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-k(\lambda)l}, \quad (1)$$

где τ_0 – коэффициент прозрачности атмосферы.

Атмосфера у поверхности земли для ТПВС представляет собой поглощающую среду, которая значительно изменяется во времени и пространстве. В ее состав входят такие газы, как двухатомные: Азот N_2 – 78%, Кислород (O_2) – 20%, Аргон (Ar) $\approx 1\%$ и др., а также трехатомные: углекислый газ (CO_2) – 0,03% и водяной пар (H_2O), последний является характеристикой влажности воздуха и вносит существенный вклад в ослабление инфракрасного излучения [3]. Наряду с газами в воздухе содержится большое количество частиц различного происхождения [4].

С учетом двух основных факторов ослабления ИК излучения в атмосфере – молекулярного поглощения и аэрозольного ослабления – выражение (1) можно представить в виде [2]

$$\tau_0 = \tau_0(\lambda) = \tau_n(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda), \quad (2)$$

где $\tau_n(\lambda)$ – коэффициент молекулярного поглощения;

$\tau_a(\lambda)$ – коэффициент аэрозольного ослабления, $\tau_a(\lambda) = e^{-k_a \cdot l}$ (k_a – показатель аэрозольного ослабления, l – толщина слоя среды).

Таким образом, для определения коэффициента прозрачности атмосферы достаточно найти значения коэффициентов $\tau_n(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$ при рассматриваемых метеорологических условиях, сезоне года и времени суток.

Особенности и правила определения $\tau_n(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$ подробно рассмотрены в специальной литературе [1, 2, 4–9, 11, 13]. В теории

$$\tau_n(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda), \quad (3)$$

где $\tau_{H_2O}(\lambda)$ – коэффициент поглощения водяного пара, $\tau_{H_2O}(\lambda) = e^{-k_{H_2O}(\lambda) \cdot \omega_0}$ (причем $k_{H_2O}(\lambda)$ – показатель поглощения водяного пара; ω_0 – толщина слоя осажденной воды на трассе 1 км);

$\tau_{CO_2}(\lambda)$ – коэффициент поглощения углекислого газа.

Концентрация углекислого газа в атмосфере зависит только от давления. На высоте уровня моря концентрацию можно считать постоянной, она мало изменяется в нижних слоях атмосферы, а основные полосы поглощения углекислого газа находятся далеко за пределами рассматриваемого спектра 8–12 мкм [2, 4, 13]. Следовательно, коэффициент пропускания углекислого газа ($\tau_{CO_2}(\lambda)$) зависит только от проходимого ИК излучением расстояния и для $l = 1$ км он приблизительно равен единице и далее рассматриваться не будет.

Аэрозольное ослабление $\tau_a(\lambda)$ оказывает существенное влияние на ИК излучения 8–12 мкм при тумане, в условиях которого молекулярным поглощением можно пренебречь. Для остальных случаев учет молекулярного поглощения обязателен.

Экспериментальные методы расчета $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ требуют наличия фактических и расчетных значений метеорологических характеристик, а именно: относительной влажности воздуха в долях единицы (f); упругости насыщающего пара для воды и льда (E), мбар; температуры воздуха (T), °С; температуры точки росы (Td), °С; толщины слоя осажденной воды на трассе 1 км (ω_0). На практике при отсутствии регулярных инструментальных наблюдений и оперативных расчетов получить значения перечисленных характеристик затруднительно. Поэтому различные исследователи старались применять, как правило, физико-статистические подходы, которые бы упрощали задачу расчета характеристик прозрачности атмосферы [4, 7, 8], что и было сделано в настоящей работе.

В процессе исследований прозрачности атмосферы в ИК области спектра для большого числа сроков метеорологических наблюдений в течение календарного года были установлены эмпирические зависимости, которые в совокупности с обработкой результатов подобных численных экспериментов других исследователей позволили получить выражение для расчета коэффициента поглощения водяным паром ($\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$) только на основе данных о температуре точки росы (4):

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = e^{-k_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot (c_0 + c_1 Td)}, \quad (4)$$

где c_0, c_1 – коэффициенты регрессии;
 Td – температура точки росы.

ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Порядок построения модели (4) аналогичен методу, описанному в [12]. Для моделирования и последующей проверки адекватности модели использовались данные многолетних наблюдений за параметрами атмосферы в период с 2005 по 2016 год в различных географических районах и климатических зонах России¹. Из полученных данных формировались выборки значений параметров атмосферы для отдельных месяцев года и сроков. Далее последовательно рассчитывались (либо брались из таблиц Пассмана – Лармора) характеристики прозрачности атмосферы с помощью теоретической модели (модель 1), результаты которой принимались за эталон. Эмпирическая модель (модель 2) [4] принималась за модель аналог и сравнивалась с предложенной моделью 3 (4).

Первая модель (модель 1). Это классическая модель, известная из трудов «классиков» в области тепловидения и метеорологии [8, 13]:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = e^{-k_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \omega_0}, \quad (5)$$

где значения $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ или $k_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ для фиксированной λ могут быть получены из таблиц Пассмана – Лармора [10, 11]. Поглощающий слой атмосферы выражен через толщину слоя жидкой воды (ω_0), образовавшейся при конденсации паров в цилиндре, длина которого равна длине трассы [8]:

$$\omega_0 = 10^5 \frac{a \cdot f}{p} \text{ (см/км)}; \quad (6)$$

$$a = 217 \cdot 10^{-6} \frac{0,75e}{T} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right); \quad (7)$$

$$f = \frac{e}{E}, \quad (8)$$

где a – абсолютная влажность, г/см³;

¹ Данные находятся в свободном доступе на сайте <https://m.gp5.ru>.

- f – относительная влажность, в долях единицы;
 ρ – плотность воды, г/см³;
 T – температура воздуха, К;
 e – упругость водяного пара, гПа;
 E – упругости насыщающего пара для воды и льда, гПа [14].

Вторая модель (модель 2). Это эмпирическая модель, полученная А.Г. Шипуновым и Е.Н. Смышкиным для приземного слоя атмосферы и различных природно-климатических зон [4]:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = e^{-a \cdot \omega_0^b}, \quad (9)$$

где a , b – параметры аппроксимации для фиксированной λ ;

$$\omega_0 = \frac{21,67 \cdot f \cdot E}{T + 273,16}, \quad (\text{см/км}). \quad (10)$$

Для получения значения ω_0 использовалась следующая эмпирическая зависимость [4]:

$$E = \exp(-0,000311 \cdot T^2 + 0,0758 \cdot T + 1,81) \quad (\text{мбар}). \quad (11)$$

где T – температура воздуха, °С.

В ходе исследований у модели 2 был выявлен ряд недостатков, главными из которых являются ошибки в моделировании толщины слоя осажденной воды. При расчете E не учитывались жидкая и твердая фазы воды в холодные периоды года. В дополнение ко всему у автора был заявлен температурный диапазон использования зависимости (8) $\pm 50^\circ\text{C}$, не подтвердившийся при температурах ниже -15°C . Данный недостаток был разрешен за счет выведенных регрессионных зависимостей, полученных отдельно для воды и льда, следующего вида:

$$\omega_{w,i} = c_0 + c_1 T d, \quad (12)$$

где $\omega_{w,i}$ – толщина слоя осажденной воды в зависимости от жидкой (w) или твердой (i) фазы воды.

Отсюда коэффициенты регрессии для различных сезонов года и времени суток фазы воды для г. Санкт-Петербурга приняли значения, приведенный в табл. 1

Таблица 1

Коэффициенты регрессии для г. Санкт-Петербурга с учетом фазы воды, сезона и времени суток

Месяц и время суток	Фаза воды	c_0	c_1
Январь 00:00	вода	5,1939207849106	0,553699261198136
	лёд	3,93579564135617	0,168321462070398
Январь 12:00	вода	5,1266606178861	0,531404110560819
	лёд	3,94360628820565	0,168472347998217
Апрель 00:00	вода	6,02446157214682	0,471500006426897
	лёд	4,30708103864725	0,204554896103236
Апрель 12:00	вода	6,52403242506035	0,501337024037249
	лёд	4,43235183909683	0,206948084570871
Июль 00:00	вода	-3,36117749184362	1,92639745667625
Июль 12:00	вода	-3,28354885379553	2,12539883761474

Окончание табл. 1

Месяц и время суток	Фаза воды	c_0	c_1
Октябрь 00:00	вода	5,49405696069912	0,783231203083543
	лёд	4,62045017108784	0,259913065259347
Октябрь 12:00	вода	5,70543894683068	0,788230963928927
	лёд	4,64448399546234	0,270760009081348

Использование эмпирических зависимостей позволило повысить точность модели прозрачности атмосферы. Результаты сравнения моделей 2 и 3 с классической моделью 1 представлены в табл. 2

Таблица 2

**Сравнение результатов вычислений средних значений толщины
слоя осажденной воды (г. Санкт-Петербург)**

Месяц, время	Среднемесячное значение ω_0 , мм/км				
	Модель 1 (M1)	Модель 2 (M2)	$\Delta^*(M1, M2)$	Модель 3 (M3)	$\Delta(M1, M3)$
Январь 00:00	8,94	6,72	2,20	8,94	0
Январь 12:00	2,98	3,09	0,11	2,98	0
Апрель 00:00	5,66	4,78	0,88	5,66	0
Апрель 12:00	6,28	4,87	1,41	6,27	0,01
Июль 00:00	23,28	12,55	10,73	23,27	0,01
Июль 12:00	25,29	12,6	12,69	25,29	0
Октябрь 00:00	8,77	6,60	2,17	8,77	0
Октябрь 12:00	8,94	6,72	2,22	8,94	0

* Δ – отклонение от среднемесячного значения толщины слоя осажденной воды, полученного классическим методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Проверка адекватности полученных значений коэффициента поглощения водяным паром проводилась на основе данных многолетних наблюдений (с 01.01.2017 по 31.03.2020) по пункту 026063 (г. Санкт-Петербург) для 00 и 12 часов суток января, апреля, июля и октября месяцев для длины волны 10 мкм. Предложенная модель (модель 3) сравнивалась с классической (модель 1) и эмпирической (модель 2) моделями. В модели 3 для расчета толщины слоя осажденной воды использовались выведенные зависимости вида (9) и показатель поглощения водяного пара $k_{(H_2O)}$, полученный из отношения

$$k_{(H_2O)} = \frac{-\ln(\tau_{\text{таб}}(\lambda))}{\omega_{\text{таб}}}, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{таб}}(\lambda)$ – коэффициент поглощения водяного пара [10];
 $\omega_{\text{таб}}$ – значение толщины слоя осажденной воды [10].

В табл. 3 приведены сравнительные оценки характеристик коэффициентов пропускания для длины волны $\lambda = 10$ мкм.

Пояснение к таблице: $\bar{\tau}_{H_2O}(\lambda)$ – среднее значение коэффициента поглощения водяного пара при поглощающем слое 1 км; $\delta_{\tau_{H_2O}(\lambda)}$ – среднее абсолютное отклонение; $\sigma_{\tau_{H_2O}(\lambda)}$ – среднее квадратическое отклонение.

Таблица 3

**Сравнительные оценки характеристик коэффициентов
поглощения водяным паром (г. Санкт-Петербург)**

Месяц и время суток	Сравниваемые модели	$\bar{\tau}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$	$\delta_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$	$\sigma_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$
Январь 00:00	Модель 1	0,961	—	—
	Модель 2	0,957	0,005	0,006
	Модель 3	0,962	0,002	0,003
Январь 12:00	Модель 1	0,963	—	—
	Модель 2	0,958	0,004	0,005
	Модель 3	0,963	0,002	0,003
Апрель 00:00	Модель 1	0,945	—	—
	Модель 2	0,948	0,007	0,009
	Модель 3	0,944	0,005	0,006
Апрель 12:00	Модель 1	0,937	0	—
	Модель 2	0,947	0,011	0,014
	Модель 3	0,938	0,008	0,011
Июль 00:00	Модель 1	0,799	—	—
	Модель 2	0,873	0,027	0,034
	Модель 3	0,796	0,014	0,018
Июль 12:00	Модель 1	0,771	—	—
	Модель 2	0,872	0,037	0,045
	Модель 3	0,772	0,023	0,028
Октябрь 00:00	Модель 1	0,913	—	—
	Модель 2	0,926	0,012	0,015
	Модель 3	0,910	0,006	0,007
Октябрь 12:00	Модель 1	0,905	—	—
	Модель 2	0,924	0,014	0,017
	Модель 3	0,905	0,007	0,009

Оценки, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о высокой точности модели 3 и расхождении модели 2 относительно классической модели.

Результаты моделирования в графическом отображении представлены на рис. 1.

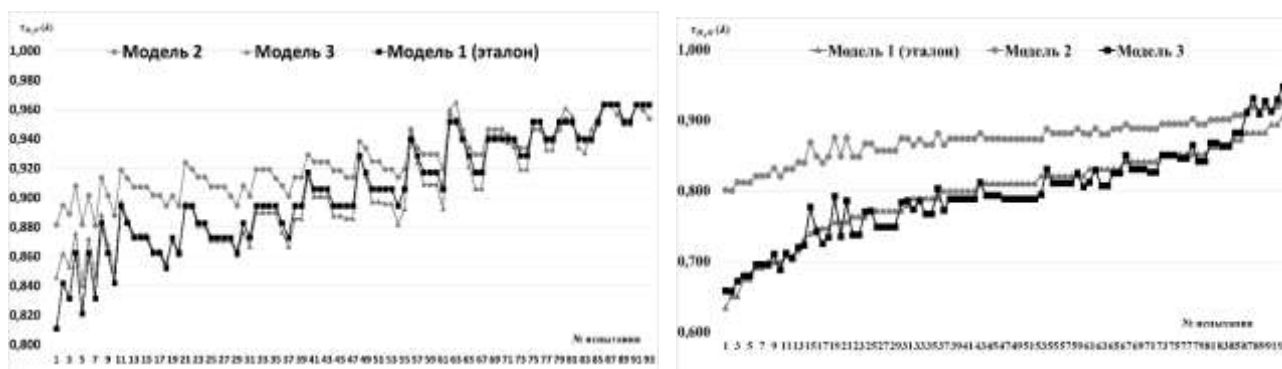


Рис. 1. Результаты моделирования коэффициента поглощения водяным паром по типам модели. Слева – октябрь 00 часов, справа – июль 00 часов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель коэффициента поглощения водяного пара для ИК излучения в диапазоне длин волн 8–12 мкм для горизонтальных трасс с дальностью 1 км достаточно полно характеризует ослабление на водяном паре при определении общего коэффициента прозрачности атмосферы, не противоречит законам физики и исследованиям ученых в данной области. Предложенная модель (4) повышает точность прогнозирования коэффициента поглощения на водяном паре до 8% в сравнении с аналогом. Эмпирическая зависимость (9) позволяет определять толщину слоя осажденной воды с учетом ее фазы (вода или лед) и повысить точность вычислений в среднем на 24% по сравнению с моделью 2. Таким образом, можно сделать вывод о применимости предложенной модели для прогнозирования коэффициента поглощения водяным паром ИК излучения с учетом географических условий, сезона и времени суток при планировании применения ТПВС.

Список используемых источников

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. Дальность действия тепловизионных систем. Ч.П. Алгоритм, исходные данные и результаты расчетов / В.М. Тымкул и др. // Автометрия. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2015. – Т. 51, вып. №2. – С. 49–53.
3. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
4. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Всепогодность радиолокационных и тепловизионных каналов наведения комплексов ПВО. – М.: Машиностроение, 2013. – 280 с.
5. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. – М.: Советское радио, 1966. – 318 с.
6. Тымкул Л.В., Тымкул В.М. Системы инфракрасной техники: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 164 с.
7. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
8. Ллойд Дж. Системы тепловидения: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
9. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
10. Passman S., Larmore L. Atmospheric Transmission. – Santa Monica: Rand Corporation, 1956. – 897 p.
11. Алёхин С.Г., Готюр И.А., Семёнов В.В. Метод расчета коэффициента прозрачности атмосферы для тепловизионных систем в спектральном диапазоне 8–12 мкм // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – №668. – С. 117–128.
12. Алёхин С.Г., Шемелов В.А., Туркин А.А. Метод статистического построения справочной модели геосфер военного назначения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – №640. – С. 161–170.
13. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
14. Психометрические таблицы / сост. Б.М. Ильин, Г.П. Резников. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Летний сад, 2009. – 316 с.

И.А. Яременко

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

МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статье описан метод, позволяющий прогнозировать время начала и окончания действия опасного явления погоды (тумана) с заблаговременностью от 10 мин до 6 ч. Для составления прогноза используется обученная модель искусственной нейронной сети, которая на основе данных о состоянии метеорологических условий за прошедшие 3 ч прогнозирует наличие или отсутствие опасного явления погоды (ОЯП), а также время начала и продолжительность явления.

Ключевые слова: нейронные сети, распределенная обработка информации, машинное обучение, метеорологическая информация.

ВВЕДЕНИЕ

Искусственные нейронные сети – неотъемлемая составляющая интеллектуальных систем. Термин «искусственный интеллект» используется для обозначения большого направления научных и прикладных исследований.

Последнее время широкое распространение получают технологии, которые используют для обработки информации машинное обучение и искусственные нейронные сети.

Роль человека в обработке больших объемов информации сводится к описанию алгоритма обработки и составлению сети синтеза новых знаний из имеющихся данных.

В метеорологии важным аспектом при составлении прогнозов являются так называемые «местные особенности» – это закономерности, характерные для конкретного района базирования и, как правило, не превышающие район базирования аэродрома (50 км). Даже в пределах одной климатической зоны на разных участках местности могут преобладать кардинально отличающиеся условия. На метеорологические условия в районе аэродрома оказывают влияние самые различные факторы: наличие поблизости лесного массива, его высота, наличие поблизости техногенных предприятий и производств, наличие озер, рек, болот и пустырей. Все эти факторы вносят свой вклад в формирование микроклимата и метеорологических условий.

Учет вышеназванных факторов – важная составляющая работы метеоролога. Проблема заключается в том, что становление метеоролога может занимать продолжительное время. Для изучения всех особенностей и приобретения навыка прогнозирования метеорологических явлений может потребоваться от 3 до 5 лет. Разработанные и принятые в ВС РФ методы прогнозирования опасных явлений погоды (ОЯП) [1] показывают удовлетворительные результаты только для европейской части Российской Федерации и всегда нуждаются в уточнении, адаптации к конкретному району базирования. Для адаптации прогностических методов необходимо наличие значительного ряда наблюдений, позволяющих рассчитать поправки для получения более точных результатов работы метода. Адаптация методов прогнозирования входит в обязанность всех синоптиков и занимает много времени и сил, кроме того, не исключены случаи неверного учета коэффициентов и неправильной интерпретации закономерностей.

В настоящее время уже существуют методы интеллектуальной автоматизации процессов обработки информации, позволяющие значительно увеличить скорость обработки данных и

точность прогнозирования метеорологических величин и явлений [2–5]. К таким методам относят:

- 1) искусственные нейронные сети;
- 2) дерево решений;
- 3) случайный лес;
- 4) кластеризацию;
- 5) поиск ассоциативных правил.

Для обработки значительного объема информации автором предлагается использовать технологии «больших данных» и распределенное хранение данных. Это позволяет, с одной стороны, увеличить максимальный объем хранилища, с другой стороны, повысить оперативность поиска и получения необходимых данных. Такой подход необходим для интеллектуальной обработки данных с использованием технологий искусственных нейронных сетей.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ОБРАБОТКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрим пути организации распределенного хранения гидрометеорологической информации (ГМИ) в целях организации ее распределенной обработки.

Согласно организационной структуре ВС РФ и установленному порядку взаимодействия метеорологических подразделений ВС РФ на метеорологические бюро армий ВВС и ПВО, Военных округов и Видовых центров управления должны быть возложены функции накопления, хранения и распространения ГМИ. Поэтому на базе изделия «Маслобойка» может быть организована система резервирования, репликации и управления базами данных (БД) ГМИ. Центральный сервер управления изделиями планируется к размещению в ГМЦ МО РФ, откуда осуществляется координирование конфигурации сети БД, а также настройка репликации и обмена ГМИ между метеорологическими подразделениями. Предложенная схема организации распределенного хранилища ГМИ показана на рис. 1.

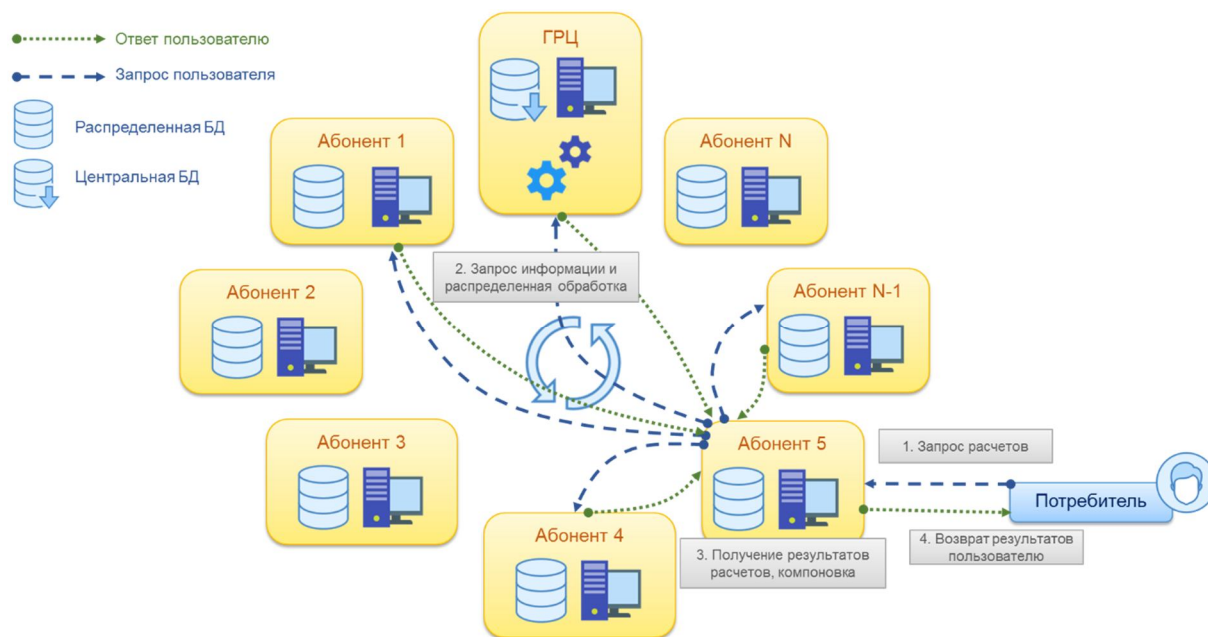


Рис. 1. Схема распределенного хранения ГМИ и обработки запросов пользователей

Ключевым моментом в организации распределенного хранилища данных является выбор ключа, по которому данные будут распределяться между базами данных. Существуют несколько вариантов выбора ключа распределения, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Распределение нагрузки между БД для различных ключей «шардирования»

№	Ключ	Нагрузка в течение дня	Примечание																		
1	Срок наблюдений	<table><caption>Estimated data for Table 1, Key: Срок наблюдений</caption><thead><tr><th>Номер БД</th><th>Количество запросов</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>700</td></tr><tr><td>2</td><td>800</td></tr><tr><td>3</td><td>900</td></tr><tr><td>4</td><td>1000</td></tr><tr><td>5</td><td>1000</td></tr><tr><td>6</td><td>900</td></tr><tr><td>7</td><td>700</td></tr><tr><td>8</td><td>400</td></tr></tbody></table>	Номер БД	Количество запросов	1	700	2	800	3	900	4	1000	5	1000	6	900	7	700	8	400	Нагрузка в течение дня распределена равномерно между базами данных
Номер БД	Количество запросов																				
1	700																				
2	800																				
3	900																				
4	1000																				
5	1000																				
6	900																				
7	700																				
8	400																				
2	Номер станции	<table><caption>Estimated data for Table 1, Key: Номер станции</caption><thead><tr><th>Номер БД</th><th>Количество запросов</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>200</td></tr><tr><td>2</td><td>100</td></tr><tr><td>3</td><td>200</td></tr><tr><td>4</td><td>200</td></tr><tr><td>5</td><td>1000</td></tr><tr><td>6</td><td>200</td></tr><tr><td>7</td><td>200</td></tr><tr><td>8</td><td>100</td></tr></tbody></table>	Номер БД	Количество запросов	1	200	2	100	3	200	4	200	5	1000	6	200	7	200	8	100	Наблюдается повышенная нагрузка на БД, содержащей информацию по метеорологическим станциям РФ
Номер БД	Количество запросов																				
1	200																				
2	100																				
3	200																				
4	200																				
5	1000																				
6	200																				
7	200																				
8	100																				
3	Тип информации	<table><caption>Estimated data for Table 1, Key: Тип информации</caption><thead><tr><th>Номер БД</th><th>Количество запросов</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1000</td></tr><tr><td>2</td><td>500</td></tr><tr><td>3</td><td>200</td></tr><tr><td>4</td><td>300</td></tr><tr><td>5</td><td>200</td></tr><tr><td>6</td><td>100</td></tr><tr><td>7</td><td>200</td></tr><tr><td>8</td><td>100</td></tr></tbody></table>	Номер БД	Количество запросов	1	1000	2	500	3	200	4	300	5	200	6	100	7	200	8	100	Наблюдается повышенная нагрузка на БД, содержащие данные наблюдения у земли и аэрологические данные
Номер БД	Количество запросов																				
1	1000																				
2	500																				
3	200																				
4	300																				
5	200																				
6	100																				
7	200																				
8	100																				
4	Изобарическая поверхность	<table><caption>Estimated data for Table 1, Key: Изобарическая поверхность</caption><thead><tr><th>Номер БД</th><th>Количество запросов</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>200</td></tr><tr><td>2</td><td>300</td></tr><tr><td>3</td><td>1000</td></tr><tr><td>4</td><td>200</td></tr><tr><td>5</td><td>500</td></tr><tr><td>6</td><td>200</td></tr><tr><td>7</td><td>100</td></tr><tr><td>8</td><td>100</td></tr></tbody></table>	Номер БД	Количество запросов	1	200	2	300	3	1000	4	200	5	500	6	200	7	100	8	100	Наблюдается повышенная нагрузка на БД, содержащую информацию о приземных наблюдениях
Номер БД	Количество запросов																				
1	200																				
2	300																				
3	1000																				
4	200																				
5	500																				
6	200																				
7	100																				
8	100																				
5	День месяца	<table><caption>Estimated data for Table 1, Key: День месяца</caption><thead><tr><th>Номер БД</th><th>Количество запросов</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>200</td></tr><tr><td>2</td><td>300</td></tr><tr><td>3</td><td>1000</td></tr><tr><td>4</td><td>200</td></tr><tr><td>5</td><td>500</td></tr><tr><td>6</td><td>200</td></tr><tr><td>7</td><td>100</td></tr><tr><td>8</td><td>100</td></tr></tbody></table>	Номер БД	Количество запросов	1	200	2	300	3	1000	4	200	5	500	6	200	7	100	8	100	При распределении информации между БД по дню месяца нагрузка на сервер за текущий день месяца будет повышена
Номер БД	Количество запросов																				
1	200																				
2	300																				
3	1000																				
4	200																				
5	500																				
6	200																				
7	100																				
8	100																				

Окончание табл. 1

№	Ключ	Нагрузка в течение дня	Примечание
6	Месяц		При распределении информации между БД по месяцам ожидаемо нагрузка за текущий месяц будет повышена
7	Год		При выборе ключа шардирования по годам нагрузка на сервер текущего года будет неравномерно превышать нагрузку на другие сервера

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод, что наиболее равномерное распределение запросов между серверами БД обеспечивается при использовании ключа распределения по стандартным срокам. В то же время для обеспечения нормального функционирования и повышения отказоустойчивости распределенной системы БД необходимо предусмотреть соблюдение следующих пунктов:

- кеширование наиболее частотных запросов в рамках обеспечения ГМИ подчиненных метеорологических подразделений;
- резервирование каналов связи между метеорологическими подразделениями объединений;
- обеспечение круглосуточного технического мониторинга функционирования БД.

Организация распределенной БД позволит обеспечить резервирование ГМИ, а также увеличить максимально возможный объем хранимой ГМИ. На данный момент обеспечивается хранение ГМИ за период в 6–7 лет. Распределенная БД позволит увеличить период хранения ГМИ до 25–35 лет, а также обеспечить распределенную обработку ГМИ в условиях ограниченности вычислительных ресурсов и непрерывного приема ГМИ.

Преимуществом распределенной обработки является то, что данные выбираются из локальной базы данных, там же они подготавливаются к передаче по каналам связи и уже в виде сформированного ответа поступают на узел, с которого запрашивалась информация. Такой подход позволяет уменьшить нагрузку на центральный сервер и, как следствие, повысить скорость поиска и получения данных.

Большое количество сегментированной и разнородной метеорологической информации необходимо для последующего «обучения» модели искусственной нейронной сети (ИНС). Под обучением в рамках интеллектуальных систем понимается корректировка весовых коэффициентов входных и выходных сигналов узлов ИНС – «нейронов». Корректировка производится путем сопоставления ожидаемого результата со значением на выходе ИНС, если ошибка превышает заданный порог, то методом обратного распространения ошибки значения весовых коэффициентов сети изменяются.

ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Обучение ИНС подразумевает под собой поиск множества таких весовых коэффициентов, использование которых позволит после некоторых преобразований отобразить множество входных сигналов сети на множество выходных сигналов:

$$P \rightarrow M, \quad (1)$$

где P – это множество входных сигналов;
 M – множество выходных сигналов сети.

Отметим, что входные сигналы, их порядок, количество и значения, передаваемые на вход, должны быть строго определены. Прежде чем информация поступит на вход ИНС, она проходит такие этапы подготовки, как:

- 1) типизация;
- 2) нормализация;
- 3) упорядочивание.

В процессе типизации информация разделяется на заданные типы и выделяются сами значения параметров:

$$P_{t_i} = f_{t_i}(P), i \in 0 \dots k, \quad (2)$$

где k – это количество возможных типов информации.

Далее значения параметров нормализуются на отрезке $[0,1]$:

$$n_{t_i} = \frac{p_{t_i} - \min(P_{t_i})}{\max(P_{t_i}) - \min(P_{t_i})}, i \in 0 \dots k, \quad (3)$$

где n_{t_i} – это нормализованные значения типа t_i . После этого значения необходимо упорядочить таким образом, чтобы структура входной матрицы была согласована со структурой обучаемой модели ИНС. В нашем случае это рекуррентная модель LSTM [6].

Для обучения возьмем следующие метеорологические величины:

- 1) температуру воздуха у земли (T);
- 2) температуру точки росы у земли (Td);
- 3) температуру воздуха на уровне 850 гпа ($T850$);
- 4) температуру точки росы на уровне 850 гпа ($Td850$);
- 5) скорость ветра на уровне 850 гпа ($VV850$);
- 6) давление у земли (P);
- 7) скорость ветра у земли (vv);
- 8) направление ветра (dd);
- 9) метеорологическую дальность видимости (V);
- 10) срок наблюдения (t);
- 11) время восхода солнца (sr);
- 12) время захода солнца (ss).

Данные объединяются в блоки по m сетов из наборов параметров за сроки $t_0 \dots t_{0-m}$, где m – экспериментально установленное количество сроков в блоке. Сет выглядит следующим образом:

$$c = [T, Td, T850, Td850, VV850, P, vv, dd, V, t, sr, ss]. \quad (4)$$

Представим блок входных параметров в виде матрицы M :

$$M = \begin{bmatrix} T_{t_0} & Td_{t_0} & \dots & vv_{t_0} & dd_{t_0} & V_{t_0} & t_{t_0} & sr_{t_0} & ss_{t_0} \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ T_{t_{0-m}} & Td_{t_{0-m}} & \dots & vv_{t_{0-m}} & dd_{t_{0-m}} & V_{t_{0-m}} & t_{t_{0-m}} & sr_{t_{0-m}} & ss_{t_{0-m}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Временная ретроспектива параметров необходима для выявления тенденций и учета их влияния на итоговый результат.

СТРУКТУРА МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ

Проблема традиционных искусственных нейронных сетей в том, что они не позволяют учитывать в расчетах свои предшествующие состояния. Так, в традиционном понимании невозможно решить задачу синтеза связанных смыслом слов в предложения, так как каждый раз информация о предшествующих состояниях заменяется текущим состоянием. Для решения таких задач были разработаны [7] рекуррентные нейронные сети – Recurrent Neural Networks (RNN). Их особенностью является то, что они содержат обратные связи, которые позволяют сохранять информацию о предыдущих состояниях нейронов.

На рис. 2 представлен фрагмент RNN A , в котором x_t – входной параметр, а h_t – выходной параметр. В то же время наличие обратной связи позволяет передавать информацию от одного шага к другому, образуя собой цепочку, по которой передается информация.

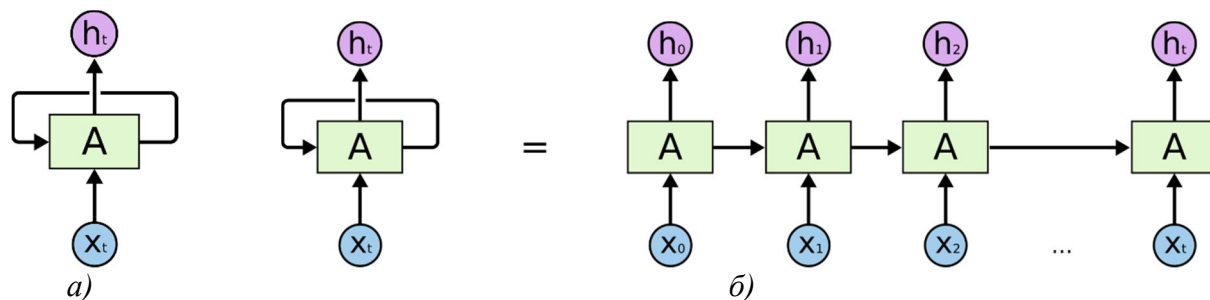


Рис. 2. Фрагмент RNN (а) и развертка фрагмента RNN (б)

Основным недостатком RNN является их плохая приспособленность к «запоминанию» долговременных зависимостей. Если количество шагов t между связанными событиями не превышает определенного значения ε , то эта связь сохраняется, в противном случае – информация о ней перезаписывается:

$$f(x_t) = \begin{cases} x_0, x_1 \dots x_t, & t < \varepsilon, \\ x_0, x_1 \dots x_t, & t \geq \varepsilon. \end{cases} \quad (6)$$

Названная проблема была описана Зеппом Хохрайтером и Иошуа Бенджио [8, 9] и решена в рекуррентных сетях типа Long short-term memory (LSTM). Их особенность заключается в способности к «запоминанию» долговременных зависимостей при $t \geq \varepsilon$. Так сохраняется информация о наиболее значимых параметрах и их сочетаниях.

Так как входными параметрами является ряд из 12 значений МВ за установленное количество сроков (а именно, 12), который объединен в наборы по 32 элемента, то первым слоем сети должен быть трехмерный массив размерностью (32, 12, 12). Следующим слоем сети является слой LSTM, на выходе которого получаем двумерный массив значений, объединенных в наборы. Далее следуют слои из 60 нейронов, после которых структура ИНС разделяется на три ветви: прогноза времени начала ОЯП, признака состояния ОЯП и время действия ОЯП.

Структура разработанной модели ИНС представлена на рис. 3.

Результатом работы модели ИНС являются три значения: время начала ОЯП от момента последнего измерения параметров атмосферы в минутах, признак наличия ОЯП и продолжительность ОЯП в минутах до прекращения его существования.

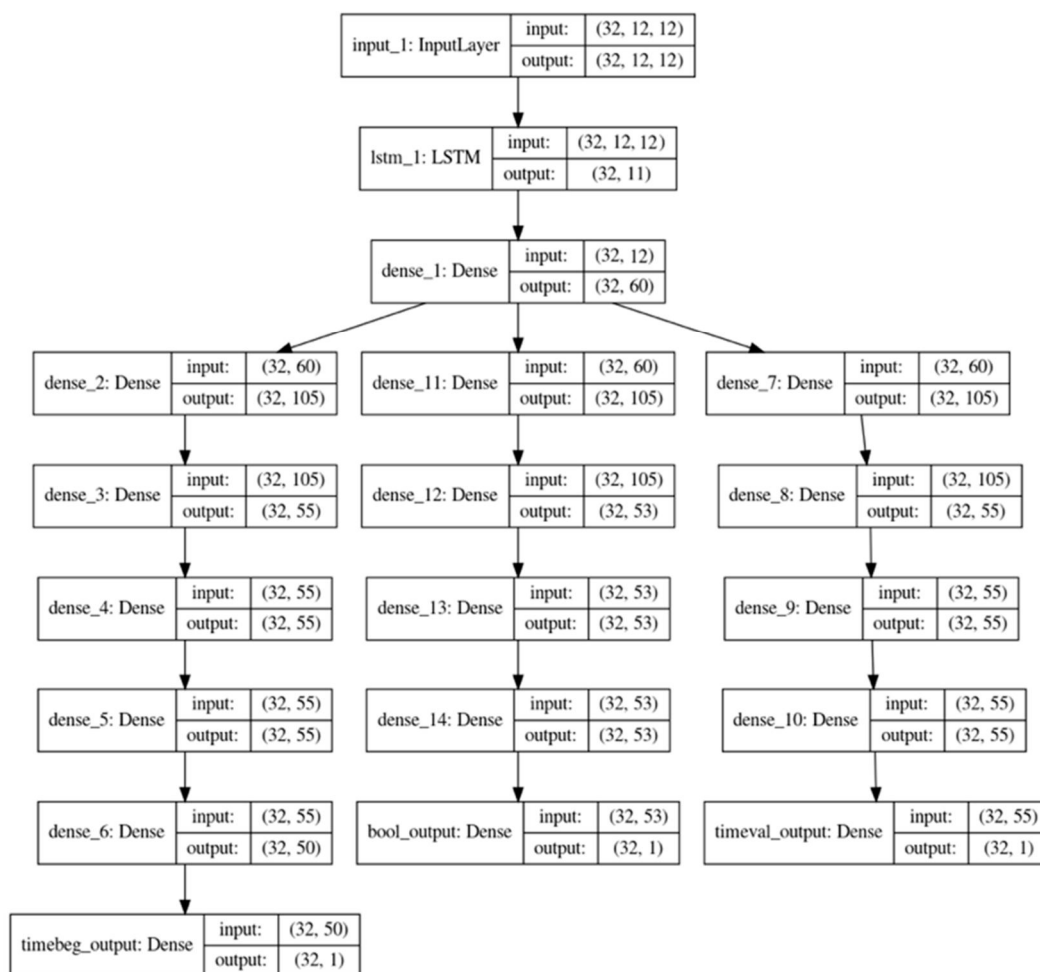


Рис. 3. Структура ИНС для прогнозирования ОЯП

Обучение модели проводилось на выборке за 2005–2015 года, тестирование выполнялось на выборке 2016–2019 годов. В качестве источника информации о состоянии МВ выбран аэропорт, так как в случае ухудшения метеорологических условий метеорологическая служба аэропорта производит дополнительные измерения с дискретностью до 15 мин. Набор обучающей выборки составил порядка 42 000 элементов, в сочетании с количеством эпох обучения (80) это позволило добиться следующих результатов. Средняя абсолютная ошибка в процентах по результатам прогнозирования продолжительности тумана составила 16%, а точность прогноза продолжительности тумана – 84%. Точность определения начала ОЯП в течение 6 ч составила 93%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенной схемы организации распределенной системы для хранения и обработки данных позволит повысить оперативность обработки больших объемов данных, в том числе для обучения ИНС и создания интеллектуальных систем.

Так, предложенный метод распределенной обработки ГМИ на основе рекуррентной ИНС LSTM типа позволил обучить модель ИНС, обеспечивающую 93%-ную точность прогнозирования начала ОЯП (тумана) в течение 6 ч, а также 84%-ную точность прогнозирования продолжительности ОЯП (тумана). Основная проблема состоит в подготовке необходимых данных для прогноза, так как модель принимает на вход данные в строго определенном по-

рядке и количестве. Так как предложенная методика полностью автоматизирована, проблема подготовки исходных данных может быть решена за счет автоматизации этого процесса. Как следствие, наблюдается значительный прирост оперативности прогнозирования ОЯП.

Список используемых источников

1. Руководство по практическим работам метеорологических подразделений авиации Вооруженных сил: Приказ ГК ВВС от 8 сентября 1992. – М.: Воениздат, 1992.
2. *Tao Y., Hsu K.* A Two-Stage Deep Neural Network Framework for Precipitation Estimation from Bispectral Satellite Information. – URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JHM-D-17-0077.1> (дата обращения: 13.03.2020).
3. CloudNet: Ground-Based Cloud Classification With Deep Convolutional Neural Network / J. Zhang, L. Pu, F. Zhang, Q. Song. – URL: <https://doi.org/10.1029/> (дата обращения: 13.03.2020).
4. *Gemma J., Donald D.* Machine Learning Predictions of a Multiresolution Climate Model Ensemble. – URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL077049> (дата обращения: 13.03.2020).
5. *Kalchbrenner N., Sønderby C.* A Neural Weather Model for Eight-Hour Precipitation Forecasting. – URL: <https://ai.googleblog.com/2020/03/a-neural-weather-model-for-eight-hour.html> (дата обращения: 13.03.2020).
6. *Кондратьева Т.Н.* Прогнозирование тенденции финансовых временных рядов с помощью нейронной сети LSTM // Вестник евразийской науки. – 2017. – №4 (41). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-tendentsii-finansovyh-vremennyh-ryadov-s-pomoschyu-neyronnoy-seti-lstm> (дата обращения: 13.03.2020).
7. *Линдигрин А.Н.* Искусственные нейронные сети как основа глубокого обучения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – №12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennye-neyronnye-seti-kak-osnova-glubinno-go-obucheniya> (дата обращения: 13.03.2020).
8. *Yoshua B.* Learning Long-Term Dependencies with Gradient Descent is Difficult. – URL: <http://ai.dinfo.unifi.it/paolo/ps/tnn-94-gradient.pdf> (дата обращения: 13.03.2020).
9. *Hochreiter J.* Untersuchungen zu dynamischen neuronalen Netzen. – URL: <http://people.idsia.ch/~juergen/SeppHochreiter1991ThesisAdvisorSchmidhuber.pdf> (дата обращения: 13.03.2020).

И.А. Готюр*,
доктор технических наук, доцент;
Е.А. Коровин*,
кандидат технических наук;
Ю.Д. Овчинников*;
И.Е. Юсупов**
кандидат физико-математических наук
*ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.
**СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРОВ-ДАЛЬНОМЕРОВ

В работе на базе анализа существующих конструкций грозопеленгаторов-дальномеров и оценок влияния шума на точность определения координат молниевых разрядов обоснованы варианты уменьшения габаритов электрической и магнитной антенн.

Ключевые слова: молниевый разряд, грозопеленгация, грозопеленгатор-дальномер, электрическая антенна, магнитная антенна.

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы известных грозопеленгаторов-дальномеров (ГПД) [1, 7] основан на приеме с последующим анализом так называемого атмосферика – электромагнитного излучения, образуемого в результате молниевых разрядов (МР) между облаком и Землей (ОЗ), внутри облаков или между облаками (ОО). В приборах данного типа для определения направления на молниевый разряд используется амплитудный метод пеленгации, реализованный на сравнении сигналов двух взаимно перпендикулярных рамочных (магнитных) и одной электрической антенн. Возможность оценивания расстояния до МР в ближней (до 100 км) зоне базируется на различии форм электрической и магнитной составляющих атмосферика в СДВ-диапазоне [2].

Совершенствование датчиков грозовой активности данного типа можно реализовать в направлениях совершенствования модели молниевых разрядов, улучшения характеристик прибора (полосы частот, чувствительности, точности временной синхронизации) для применения в пеленгаторных и разностно-дальномерных сетях, улучшения массогабаритных показателей [3]. Основным преимуществом ГПД перед другими системами мониторинга грозовой активности является возможность определения координат МР с использованием одного датчика. С учетом простоты развертывания и настройки становится актуальным вопрос включения ГПД в состав мобильных (переносных) метеорологических комплексов (комплектов). Развитие современной электроники позволяет в значительной мере уменьшить размеры блока приема и обработки сигналов, поступающих от антенны ГПД, который может быть реализован на одной печатной плате площадью менее 1 дм². При этом габариты самой антенны остаются неизменными со времен первых промышленных образцов конца 70-х годов прошлого столетия. В данной работе рассмотрен вопрос оптимизации габаритов антенной системы ГПД.

АНТЕННЫ ОДНОПУНКТОВЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

Электрическая антенна современных ГПД (Очаг-2П, ГДА-1, ФАГ-2Н) представляет собой две круглые пластины радиусом 150–200 мм, разнесенные на расстояние порядка 300–500 мм. Применимость данной конструкции обусловлена высокими значениями напряженности электрического поля, формируемого в пункте приема сильноточными разрядами на расстояниях рабочей зоны ГПД до 100 км. Согласно экспериментальным данным [1] средние значения напряженности электрического поля на дистанции 100 км от разрядов ОЗ составляют 6–8 В/м.

Магнитные антенны ГПД реализуются либо в виде рамочных, либо в виде более компактных ферритовых антенн. Рамочные антенны мотаются на каркас размером не менее 300 x 400 мм. Ферритовые антенны выполняются в виде катушек диаметром порядка 14–16 мм на стержне длиной до 200 мм. Для увеличения действующей высоты применяется вариант с двумя включенными параллельно антеннами (рис. 1). Основная сложность в изготовлении магнитных антенн – обеспечение равномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе работы ГПД при сохранении требуемой действующей высоты.



Рис. 1. Электрическая и магнитные антенны ГПД ФАГ-2Н

Погрешности оценивания параметров положения [6] (азимута и дальности) источника атмосферика связаны с уровнем электромагнитных помех и упрощениями, принятыми в дипольном приближении МР. Отношение сигнал/шум принимаемого электромагнитного импульса оказывает несколько меньшее влияние [2]. Снижение уровня электромагнитных помех, образуемых в основном промышленной электрической сетью, достигается заземлением датчика, установкой ГПД вдали от электрических подстанций и высоковольтных ЛЭП. Ошибки, вызванные отклонением канала молнии от принятой в расчетах параметров положения модели электрического диполя, в приборах этого типа принципиально не устранимы.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

Уменьшение геометрических размеров электрической и магнитной антенн ведет к уменьшению их действующих высот и, соответственно, амплитуд напряжения на входе аналогового тракта. Собственные шумы используемых в схемах ГПД операционных усилителей (ОУ) определяют минимально требуемое значение амплитуды напряжения антенн, необходимое при реализации вычислений координат МР. Наиболее чувствительными к шумам являются алгоритмы определения дальности до МР [2]. Погрешность определения расстояния ГПД,

реализующего фазовый алгоритм, в пределах рабочей зоны составляет 10% от дальности при амплитуде принятого атмосферика, в 100 раз большей амплитуды шума (40 дБ). Эти данные были приняты за основу при расчете малогабаритной антенны. Амплитудные алгоритмы, использующие для определения дальности до МР значения или отношения амплитуд сигналов электрической и магнитных антенн, ввиду их низкой точности, в данной работе не рассматриваются.

Шумы схемы усилителя на ОУ применительно к аналоговому тракту ГПД определяются в основном двумя параметрами. Первый – это шумы ОУ, определяемые как приведенное к входу среднеквадратичное напряжение шумов. Второй параметр – используемая полоса частот. Расчет шумов без учета внутреннего сопротивления источника сигнала и значений, применяемых в схеме сопротивлений, производится согласно выражению

$$U_{\text{III}} = e_n \sqrt{\Delta f}, \quad (1)$$

где e_n – приведенное к входу среднеквадратичное напряжение шумов;

 Δf – требуемая полоса частот.

В качестве первого каскада усилителя для расчета размеров малогабаритной антенны была выбрана схема инструментального усилителя, собранного на ОУ ОРА2350 (рис. 2). Значение e_n данного ОУ составляет $5\text{нВ}\sqrt{\text{Гц}}$.

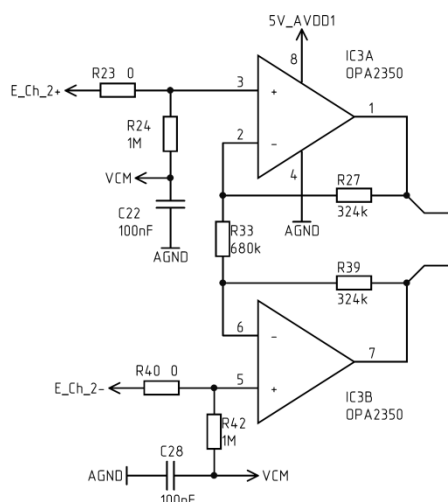


Рис. 2. Принципиальная схема первого каскада ГПД

Требуемая для реализации фазового метода определения дальности полоса частот должна обеспечивать анализ сигналов в диапазоне от 300 Гц до 5 кГц. Как правило, полоса частот ГПД составляет от 16 до 100 кГц. Расширение полосы частот позволяет реализовать более точную привязку ко времени при реализации разностно-дальномерного метода определения координат [3]. Для полосы сигнала 16 кГц, согласно выражению (1), среднее квадратическое значение напряжения шума составляет 1,26 мкВ. Амплитуда полезного сигнала на входе ОУ в этом случае должна быть не менее 126 мкВ.

Наведенная в приемной антенне э.д.с. выражается через напряженность электрического поля и действующую высоту антенны [4]:

$$U_a = h_a E, \quad (2)$$

где h_d – действующая высота антенны;

E – напряженность электрического поля.

Действующая высота антенны при напряженности электрического поля 3 В/м должна превышать значение 42 мкм. Для расчета параметров магнитных антенн используется известное [4] выражение

$$h_d = \mu_d \frac{2\pi}{\lambda} \omega_k S, \quad (3)$$

где μ_d – действующее значение относительной магнитной проницаемости сердечника;

ω_k – число витков катушки;

S – площадь одного витка катушки;

λ – длина волны.

Число витков рамочной антенны с действующей высотой 53 мкм и каркасом 300 x 400 мм для частоты 300 Гц должно быть не менее 35. Уменьшение размеров антенны в 2 раза повлечет 4-кратное увеличение числа витков.

Увеличение действующего значения относительной магнитной проницаемости позволяет уменьшить диаметр антенны с сохранением значения действующей высоты. Действующая высота антенны 53 мкм может быть достигнута при использовании катушки индуктивности на ферритовом стержне длиной 100 мм и диаметром 8 мм с магнитной проницаемостью 400. Диаметр катушки – 11 мм, длина намотки – 80 мм. Действующее значение относительной магнитной проницаемости сердечника μ_d определяется из выражения [5]

$$\mu_d = \mu_{\text{экв}} m_l p_l q_l, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{экв}}$ – значение эквивалентной магнитной проницаемости сердечника;

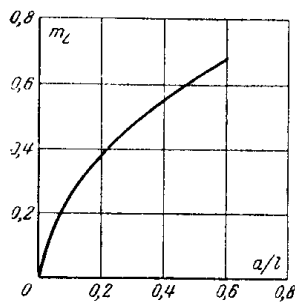
m_l – коэффициент, определяемый отношением длин катушки и сердечника (рис. 3);

p_l – коэффициент, зависящий от положения катушки на сердечнике (рис. 3);

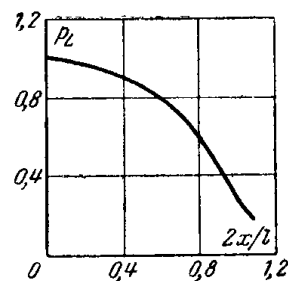
q_l – отношение квадратов диаметра сердечника к диаметру катушки.

Значение эквивалентной магнитной проницаемости цилиндрического сердечника может быть получено из эмпирического выражения [5]

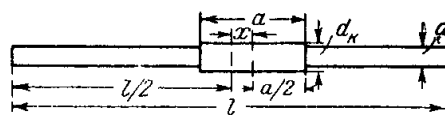
$$\mu_{\text{экв}} = \frac{\mu_n}{1 + 0.84 \left(\frac{d}{l} \right)^{1.7} (\mu_n - 1)}. \quad (5)$$



а



б



с

Рис. 3. Зависимости коэффициента m_l от отношения длин катушки и сердечника (а) и коэффициента p_l от расположения катушки на стержне (б); размеры антенной катушки (с)

При заданных размерах катушки и ферритового стержня, используя выражения (5) и (4), а также данные графиков (рис. 3, а и б), получаем действующее значение относительной магнитной проницаемости сердечника, равное 30. Требуемое число витков для получения заданного значения действующей высоты составит 1400.

Оптимизация габаритов электрической антенны производится пропорциональным уменьшением диаметра пластин и расстояния между ними. Исходя из полученных выше размеров магнитной антенны, диаметр пластин электрической антенны не имеет смысла делать меньше 100 мм. Уменьшение диаметра пластин в 3 раза приведет к уменьшению тока в 9 раз. Компенсировать меньшее значение тока антенны можно, увеличив входное сопротивление схемы на рис. 2 путем замены резисторов R24 и R42 на более высокоомные, например 5 МОм. Увеличение номинала этих резисторов ведет к изменению частоты среза фильтра высоких частот (ФВЧ), образуемого резисторами R24, R42, емкостью антенны (C_a) и включаемых параллельно антенне корректирующими конденсаторами (C_k) емкостью 300 пФ. Уменьшение емкости корректирующих конденсаторов до значения 60 пФ позволяет восстановить требуемую частоту среза ФВЧ (300 Гц), уменьшая при этом в 5 раз коэффициент деления емкостного делителя, образованного C_a и C_k . Исходя из этого расстояние между пластинами можно уменьшить без ухудшения отношения сигнал/шум в 5 раз. Таким образом, коррекция параметров входных цепей аналогового тракта ГПД позволяет в 3 раза уменьшить диаметр пластин электрической антенны и до 5 раз – расстояние между ними без ухудшения отношения сигнал/шум. Важным является учет тока утечки при выборе ОУ первого каскада инструментального усилителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потенциал совершенствования конструкции существующих однопозиционных систем мониторинга грозовой активности не ограничен улучшением точностных и вероятностных характеристик. Анализ шумовых характеристик входных цепей ГПД с учетом усредненных данных амплитуд атмосфериков и ограничений, принятых в алгоритмах дальнометрии, открывает возможности снижения требований к действующим высотам электрической и магнитной антенн. Оптимизация размеров антенн позволит в значительной степени улучшить массогабаритные и эксплуатационные характеристики ГПД, что, в свою очередь, обеспечит возможность включения приборов данного типа в состав аппаратуры мобильных метеорологических комплексов.

Список используемых источников

1. Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозowych очагов. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 220 с.
2. Кононов И.И., Юсупов И.Е., Кандарацков Н.В. Анализ однопунктовых методов пассивной локации грозowego разряда // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 11-12. – С. 875–888.
3. Денисенков Д.А., Коровин Е.А. Универсальный датчик мониторинга грозовой активности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – № 653. – С. 164–168.
4. Васильев В.А. Антенны портативных приемников. – М.: Энергия, 1973. – 39 с.
5. Хомич В.И. Ферритовые антенны. – М.: Энергия, 1969. – 92 с.
6. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1958. – 56 с.
7. ООО «Цифровой Дракон»: [сайт]. – URL: <http://www.digital-dragon.ru> (дата обращения: 5.03.2020).

А.Н. Григорьев*,
доктор технических наук;
В.В. Зайцев*,
кандидат технических наук;
Д.Н. Комраков*;
Н.В. Масеев*;
В.Ю. Рябчевский*

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

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА В ЗАДАЧЕ ВОЗДУШНОГО МОНИТОРИНГА ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА

Рассматривается прикладная задача по мониторингу удаленного площадного объекта с использованием аэрофотосъемочных средств, реализованных на базе беспилотных летательных аппаратов. В частности, исследуется возможность оптимизации бортового специального комплекса, формируемого на основе компоновки оптико-электронных камер.

Предложена методика выбора оптимальной компоновки бортового комплекса, основанная на разработанном аналитическом аппарате моделирования средства и процесса аэрофотосъемки. Новизна разработанного математического аппарата состоит в описании особенностей формирования компоновки камер, учете потерь съемочного времени от выполнения разворотов для захода на следующий маршрут, а также в получении аналитической зависимости числа маршрутов съемки от параметров, характеризующих условия аэрофотосъемки.

Результат выполнения методики заключается в определении числа камер в компоновке бортового комплекса, при котором в конкретных условиях аэрофотосъемки обеспечивается максимальная результативность. Для подтверждения реализуемости методики представлены результаты расчета контрольного примера, показывающие существование оптимальной компоновки бортового комплекса.

Ключевые слова: площадной объект, аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, оптико-электронная камера, бортовой специальный комплекс, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения состояния природной среды используются, в частности, материалы оптико-электронной съемки, по которым формируются фотокарты, фотопланы и ортофотопланы местности. Такие материалы могут быть получены в результате использования космических или воздушных средств, оснащенных оптико-электронными бортовыми специальными комплексами (БСК). В условиях ограниченного временного ресурса, территориальной доступности объекта мониторинга и необходимости выполнения плановой и перспективной оптико-электронной съемки со сверхвысоким пространственным разрешением на современном уровне развития методов и средств дистанционного наблюдения единственной альтернативой является воздушный мониторинг. В том случае, если размеры объекта мониторинга существенно превосходят полосу захвата БСК на местности, он является площадным объектом и необходимо выполнение многомаршрутной аэрофотосъемки [1].

В отрасли воздушного мониторинга отдельные тенденции развития состоят в обосновании и отработке методов и средств использования беспилотных летательных аппаратов (БЛА), в частности для выполнения оптико-электронной съемки местности. Тогда задачу построения аэрофотосъемочного комплекса из имеющихся серийно производимых компонентов в общем виде можно разделить на две частные задачи. Первая задача состоит в выборе БЛА – носителя оптико-электронного БСК. Вторая задача, решаемая в рамках настоящего исследования, состоит в выборе оптико-электронного БСК, в качестве которого рассматриваются оптико-

электронные цифровые камеры, основанные на матричном фотоприемном устройстве (ФПУ) и обеспечивающие получение кадровых снимков местности.

Современные компактные оптико-электронные камеры, пригодные для использования в качестве БСК, характеризуются массой 0,5–3 кг и габаритами 5–30 см. Например, масса и габаритные размеры промышленной камеры JAI SP-20000C (20 Мп) с объективом ZEISS Distagon T* 2/35 составляют 900 гр и 155×60×60 мм, аэрофотосъемочной камеры PhaseOne iXM-RS150F (150 Мп) с объективом RS Lenses 32 mm – 2 кг и 190×90×90 мм.

Качество БЛА характеризуется, в частности, значением массы допустимой нагрузки, определяемым разностью максимальной взлетной массы и массы конструкции планера с силовой установкой и элементами управления полетом (массы «сухого» БЛА). На практике в случае использования БЛА с двигателем внутреннего сгорания допустимая нагрузка распределяется на полезную нагрузку и запас топлива. В настоящей работе масса полезной нагрузки соответствует массе размещенного на борту БСК, с которым может выполняться взлет и совершаться необходимый перелет. Весовая отдача современных легких и средних БЛА позволяет использовать для съемки местности не одну оптико-электронную камеру рассматриваемого класса, а их компоновку, включающую определенное число таких камер. Положительный эффект от увеличения числа камер при сохранении высоты съемки состоит в возможности расширения полосы захвата БСК от l_y до l_{yb} на местности без существенного ухудшения пространственного разрешения (рис. 1). Для достижения указанного эффекта оптико-электронные камеры в составе компоновки БСК должны быть согласованно размещены и ориентированы для формирования общего непрерывного углового поля зрения поперек направления движения БЛА (рис. 1,б). При этом анализ существующих работ показывает, что проработка методологии использования компоновки БСК из оптико-электронных камер для аэрофотосъемки с борта БЛА носит сугубо эмпирико-прикладной характер и не имеет развитой теоретической базы [2, 3].

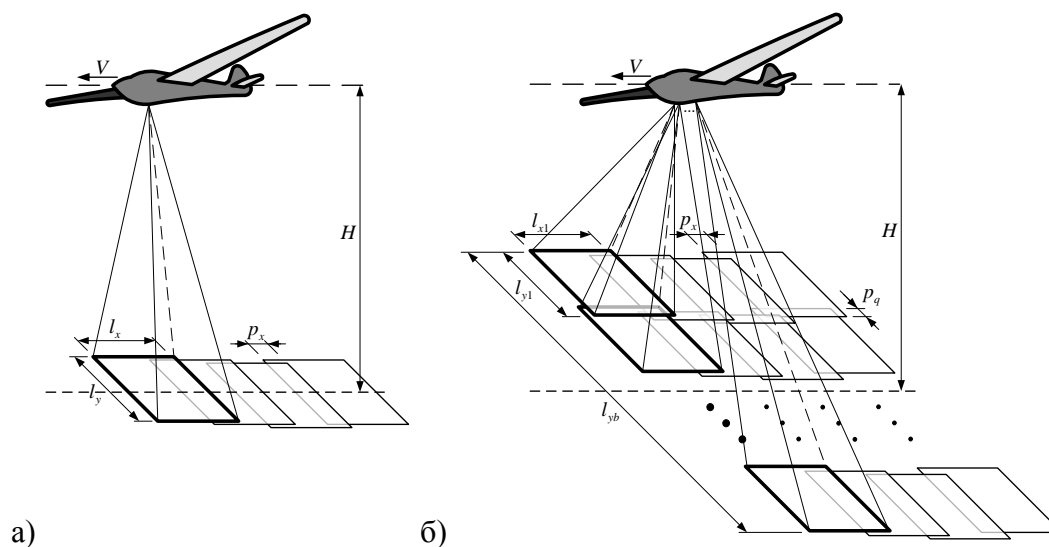


Рис. 1. Варианты маршрутной кадровой аэрофотосъемки с использованием разных компоновок БСК:

а – одна оптико-электронная камера; б – компоновка из нескольких камер

Пропорциональное числу камер увеличение массы полезной нагрузки обусловит уменьшение массы запаса топлива, что, в свою очередь, приведет к сокращению продолжительности полета БЛА. В силу этого при выборе компоновки БСК требуется принять решение: использовать БЛА с сокращенным полем зрения БСК при увеличенной продолжительности полета или с расширенным полем зрения при уменьшенной продолжительности полета.

Гипотеза настоящего исследования состоит в том, что при выбранном БЛА существует оптимальная компоновка оптико-электронного БСК. При такой компоновке обеспечивается максимальный положительный эффект от ведения аэрофотосъемки, который предлагается характеризовать показателем результативности. В качестве такого показателя результативности предлагается использовать оценку площади, отснятой за один вылет БЛА [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что направление исследований по выбору компоновки оптико-электронного БСК, предназначенного для использования на борту БЛА для аэрофотосъемки площадного объекта, является актуальным. Цель исследования состоит в улучшении результативности аэрофотосъемки площадного объекта. Для достижения поставленной цели решается задача по разработке методики выбора оптимальной компоновки оптико-электронного БСК. Указанная методика предназначена для определения числа камер в компоновке БСК, использование которой за один цикл функционирования БЛА обеспечивает максимальную результативность аэрофотосъемки удаленного площадного объекта.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ БЛА И КОМПОНОВКИ БСК

В качестве носителя компоновки оптико-электронного БСК рассматривается БЛА самолетного типа, характеризуемый набором параметров $X_{\text{БЛА}} = (V, \beta_{\text{max}}, D_{\text{max}}, H_{\text{max}}, m_{\text{сух}}, m_{\text{взл}}, \delta)$, где V – крейсерская скорость полета; β_{max} – предельный угол крена при выполнении разворота; D_{max} – максимальная дальность полета БЛА, у которого допустимая нагрузка полностью выделена для запаса топлива; H_{max} – практический «потолок» полета БЛА; $m_{\text{сух}}$ – масса конструкции БЛА с силовой установкой и элементами управления (масса незаправленного БЛА без БСК); $m_{\text{взл}}$ – максимальная взлетная масса БЛА; δ – коэффициент, определяющий долю запаса топлива на момент выполнения запланированной посадки БЛА.

В отношении модели использования БЛА принимаются следующие упрощения. Исследуется полет БЛА по идеальной траектории, т. е. без учета воздействия потоков воздуха в атмосфере. Взлет и посадка БЛА осуществляются в одном пункте. В ходе одного цикла функционирования БЛА последовательно выполняются взлет, перелет до объекта, многомаршрутная съемка площадного объекта, обратный перелет и посадка БЛА. При съемке удаленного объекта не учитывается неравномерность скорости полета БЛА. При съемке объекта полет выполняется по параллельным маршрутам с номинальными параметрами съемки.

Компоновка БСК состоит из одной или большего числа оптико-электронных камер, основанных на матричном ФПУ и характеризуемых идентичными параметрами. Учитываемые при моделировании параметры компоновки БСК включают $X_{\text{БСК}} = (b, m_{\text{кам}}, f, a_x, a_y, a_p, p_q)$, где b – число камер в компоновке БСК; $m_{\text{кам}}$ – масса одной камеры; f – фокусное расстояние объектива камеры; a_x и a_y – ширина и длина светочувствительной площадки матричного ФПУ соответственно; a_p – размер фоточувствительной ячейки ФПУ; p_q – перекрытие угловых полей зрения смежных камер в компоновке БСК (в процентах).

Предполагается, что к материалам аэрофотосъемки сформулированы рекомендации $X_{\text{ТРЕБ}} = (p_x = p_{x \text{ треб}}, p_y = p_{y \text{ треб}}, n_x = n_{x \text{ треб}}, R' \leq R'_{\text{треб}})$, где p_x – продольное перекрытие снимков; p_y – поперечное перекрытие снимков; n_x – число продольных базисов съемки B_x за пределами объекта; R' – максимально допустимое пространственное разрешение снимка; $p_{x \text{ треб}}, p_{y \text{ треб}}, n_{x \text{ треб}}, R'_{\text{треб}}$ – номинальные значения соответствующих параметров. Выполнение рекомендаций частично обеспечивает фотограмметрическое и изобразительное качество снимков, т. е. их пригодность для формирования фотокарт и ортофотопланов.

Площадной объект съемки представлен участком местности, граница которого имеет форму прямоугольника. Пространственные свойства объекта, определяющие результативность аэрофотосъемки, предлагается характеризовать удаленностью объекта от пункта взлета и посадки БЛА D и удлинением объекта l – отношением длины объекта L_x к его ширине L_y . Таким образом, описание объекта имеет вид $X_{\text{Об}} = (D, l)$. Особенность предложенного описа-

ния состоит в том, что размеры объекта не представлены в явном виде, а заменены совокупным параметром – удлинением l . Аэрофотосъемка объекта выполняется по маршрутам, оси которых ориентированы вдоль длинной стороны объекта (рис. 2).

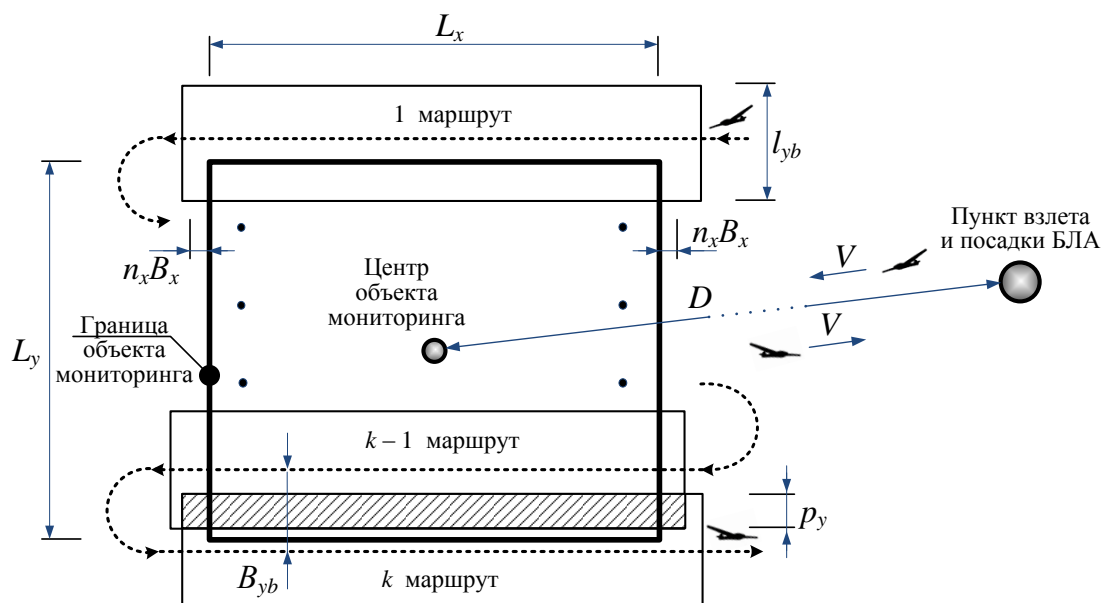


Рис. 2. Обобщенная схема и параметры многомаршрутной аэрофотосъемки площадного объекта мониторинга, где k – число маршрутов;
 B_{yb} – поперечный базис съемки

Указанные показатели свойств БЛА – $X_{БЛА}$, БСК – $X_{БСК}$, требований к аэрофотосъемке $X_{ТРЕБ}$ и объекта съемки $X_{ОБ}$ в основном рассматриваются в качестве параметров при исследовании результативности аэрофотосъемки и в данных для разработанной методики выбора исходной компоновки БСК оптимального качества. В качестве переменной величины целесообразно принять число камер b в компоновке БСК, в силу того что требуется определить оптимальную компоновку БСК из $b_{опт}$ камер, использование которой обеспечит максимальную производительность аэрофотосъемки.

СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ БСК

Для решения задачи определения состава компоновки БСК предлагается методика, содержание которой поясняется представленной схемой (рис. 3). В качестве исходных данных (блок «1») используются параметры: $X_{БЛА}$, $X_{БСК}$, $X_{ТРЕБ}$ и $X_{ОБ}$.

На основе параметров БЛА и удаленности объекта D определяется максимально возможное число камер в компоновке БСК b_{max} (блок «2»):

$$b_{max} = \left\lfloor \frac{m_{нагр max}}{m_{кам}} \right\rfloor; m_{нагр max} = m_{взл} \frac{e^{\frac{2D}{B}} - \delta}{1 - \delta} - m_{сух}; B = \frac{D_{max}}{\ln(m_{взл}/m_{сух})}, \quad (1)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – оператор округления к меньшему целому значению;

$m_{нагр max}$ – максимальная масса нагрузки, которая может быть выделена для размещения БСК;

B – коэффициент Бреге.

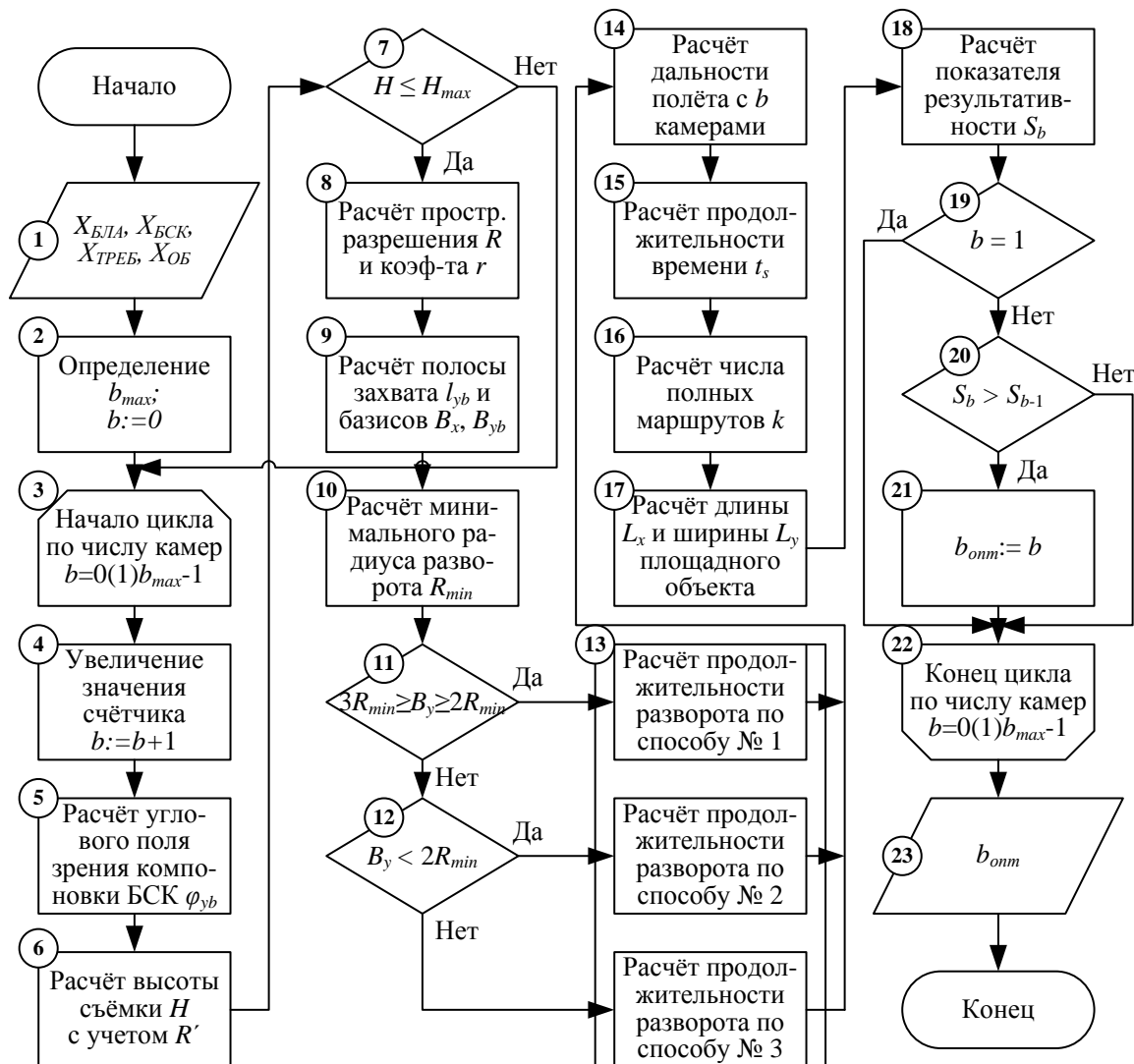


Рис. 3. Схема выполнения вычислений в методике выбора оптимальной компоновки оптико-электронного БСК

В условиях, когда неизвестны аэродинамическое качество планера БЛА и удельный расход топлива силовой установки, коэффициент B можно выразить из формулы Бреге и оценить при известной максимальной дальности полета D_{max} полностью заправленного БЛА без полезной нагрузки. Число камер b_{max} формирует БСК, с которым как минимум обеспечивается полет БЛА до объекта аэрофотосъемки и обратно до пункта посадки. Кроме того, на рассматриваемом шаге методики (блок «2») числу камер b присваивается нулевое значение.

Последовательный анализ всех вариантов компоновки, согласно схеме на рис. 3, обеспечивается циклом с числом повторений, равном максимально возможному числу камер b_{max} (блоки «3» и «22»), и счетчиком (блок «4»). Внутри цикла последовательно выполняются вычисления, которые распределяются по трем этапам: расчет параметров аэрофотосъемки (блоки «5»–«9»), расчет параметров полета БЛА (блоки «10»–«15»), оценивание результативности аэрофотосъемки и определение оптимального числа камер b_{opt} (блоки «16»–«21»).

ЭТАПЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

К определяемым параметрам аэрофотосъемки относятся угловое поле зрения компоновки БСК φ_{yb} , высота съёмки H , пространственное разрешение R , полоса захвата l_{yb} , продольный

B_x и поперечный B_{yb} базисы съемки (рис. 4). На основе числа камер b рассчитывается угловое поле зрения компоновки БСК φ_{yb} (блок «5»):

$$\varphi_{yb} = \varphi + \varphi(b-1)\left(\frac{(100-p_q)}{100}\right); \varphi = 2 \arctan(a_y/2f), \quad (2)$$

где φ – угловое поле зрения одной камеры.

С учетом требования к пространственному разрешению R' , которое при плановой съемке имеет место на краю полосы захвата (рис. 4), рассчитывается высота H (блок «6»):

$$H = R' / \left(\tan\left(0,5\varphi_{yb} + \arctan\left(a_p/2f\right)\right) - \tan\left(0,5\varphi_{yb} - \arctan\left(a_p/2f\right)\right) \right). \quad (3)$$

Полученная высота аэрофотосъемки H сравнивается с «практическим потолком» полета БЛА H_{\max} (блок «7»). Если полученное значение высоты больше «практического потолка» полета БЛА, то целесообразно рассмотреть вариант с большим числом камер в компоновке БСК. В другом случае, если правило выполняется, то полет БЛА может производиться с учетом рассчитанной высоты (4). На основе корректного значения высоты H определяются пространственное разрешение в центре полосы захвата R и коэффициент r , характеризующий ухудшение пространственного разрешения от центра к краю полосы захвата (блок «8»), полоса захвата l_{yb} , продольный B_x и поперечный B_{yb} базисы аэрофотосъемки (блок «9»):

$$R = \frac{a_p H}{f}; r = \frac{R}{R'}; l_{yb} = 2H \tan\left(\frac{\varphi_{yb}}{2}\right); B_x = \frac{a_x H}{f} \left(\frac{100-p_x}{100}\right); B_{yb} = l_{yb} \left(\frac{100-p_y}{100}\right). \quad (4)$$

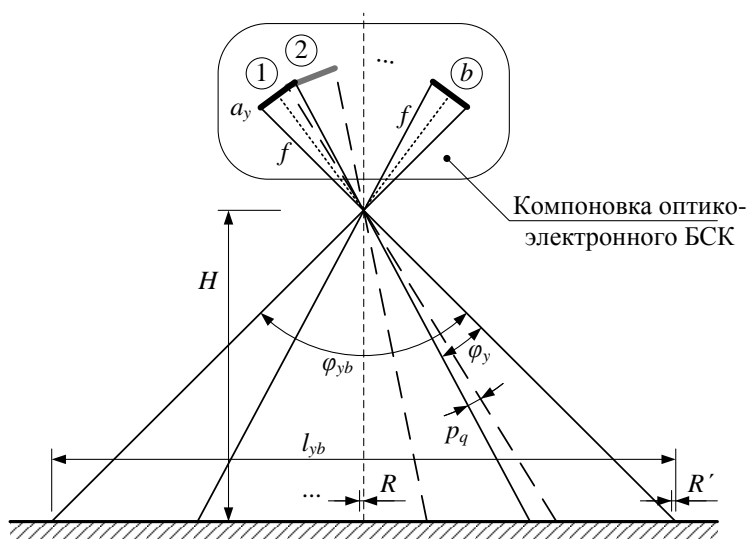


Рис. 4. Отдельные параметры аэрофотосъемки

Таким образом, формулы (2)–(4) позволяют вычислить параметры аэрофотосъемки, соблюдение которых отчасти обеспечивает требуемое фотограмметрическое качество регистрируемых снимков. Выполнение ряда других требований основано на определении параметров полета БЛА при многомаршрутной съемке площадного объекта.

ЭТАПЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТА БЛА

Многомаршрутная съемка выполняется в режиме полета прямолинейными параллельными галсами. Смена галса, соответственно и заход на следующий маршрут съемки, производится путем разворота БЛА, который в зависимости от параметров аэрофотосъемки и летных возможностей БЛА может выполняться одним из известных способов [5]. Для выбора спосо-

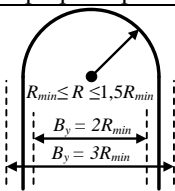
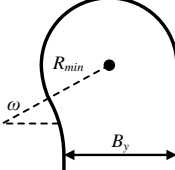
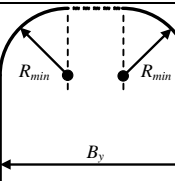
ба захода на следующий маршрут сравнивается межмаршрутное расстояние (поперечного базиса съемки B_{yb}) и минимальный радиус разворота БЛА R_{\min} (блоки «10»–«12»):

$$R_{\min} = V^2 / (9,81 \tan \beta_{\max}). \quad (5)$$

В рамках предлагаемой методики рассматривается три способа захода на следующий маршрут (рис. 4), каждый из которых характеризуется формализованным критерием выбора и продолжительностью выполнения разворота по времени t_c . На основе результата проверки выполнения критериев (блоки «11» и «12») выбирается конкретный способ захода на следующий маршрут и вычисляется продолжительность разворота t_c (блок «13»).

Таблица 1

Описание способов захода на следующий маршрут

Наименование способа	Критерий выбора способа	Трасса полета БЛА при развороте	Формула расчета продолжительности разворота
Способ № 1 – заход одним разворотом на 180°	$3R_{\min} \geq B_y \geq 2R_{\min}$		$t_c = \frac{\pi R}{V}$
Способ № 2 – заход стандартным разворотом с углом отворота	$B_y < 2R_{\min}$		$t_c = \frac{2\pi R_{\min} (180 + 2 \arccos(B_{yb}/2R_{\min}))}{360V}$
Способ № 3 – заход двумя последовательными разворотами на 90°	$B_y > 3R_{\min}$		$t_c = \frac{R_{\min} (\pi - 2) + B_{yb}}{V}$

От числа камер в компоновке БСК зависит дальность полета D_b (блок «14») и продолжительность времени, имеющегося для выполнения аэрофотосъемки (блок «15»):

$$D_b = B \ln \left(\frac{m_{\text{взл}}}{(1-\delta)(m_{\text{взл}} + bm_{\text{кам}}) + \delta m_{\text{взл}}} \right); \quad t_s = \frac{D_b - 2D}{V}. \quad (6)$$

Знание общей продолжительности времени для полета над площадным объектом t_s и продолжительности выполнения разворота для захода на следующий маршрут t_c , в ходе которого регистрация снимков не производится, обеспечивает возможность учета потери времени, обусловленной функционированием БЛА в режиме многомаршрутной аэрофотосъемки.

ЭТАПЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА КАМЕР

На основе допущений к описанию площадного объекта и функционирования БЛА, а также с учетом требований, предъявляемых к многомаршрутной аэрофотосъемке для обеспечения фотограмметрического качества регистрируемых снимков, получена следующая система уравнений, преобразование которой позволяет получить квадратное уравнение:

$$\begin{cases} L'_x = V \frac{t_s - t_c k'}{k'} - 2n_x B_x \\ L'_y = l_{yb} + B_{yb} (k' - 3) \quad , \quad l B_{yb} k'^2 + (2n_x B_x + l l_{yb} + V t_c - 3 l B_{yb}) k' - V t_s = 0. \\ L'_x = l L'_y \end{cases} \quad (7)$$

Вариант такой системы уравнений для случая сканерной съемки с БЛА исследован в работе [4]. Для обеспечения фотограмметрического качества регистрируемых снимков учтены требования к прокладке крайних маршрутов вдоль границы объекта и к протяженности маршрутов за пределами границы объекта [6]. На основе корня квадратного уравнения определяется число полных маршрутов аэрофотосъемки (блок «16»):

$$k = \lfloor k' \rfloor = \left\lfloor \frac{3l B_{yb} - 2B_x n_x - l l_{yb} - V t_c + \sqrt{(2B_x n_x + l l_{yb} + V t_c - 3l B_{yb})^2 + 4l B_{yb} V t_s}}{2l B_{yb}} \right\rfloor. \quad (8)$$

В свою очередь, длина L_x и ширина L_y площадного объекта и показатель результативности S_b аэрофотосъемки рассчитываются по формулам (блоки «17» и «18»):

$$L_x = (V(t_s - t_c k)/k) - 2n_x B_x; \quad L_y = l_{yb} + B_{yb} (k - 3); \quad S_b = L_x L_y. \quad (9)$$

Для определения оптимального числа камер $b_{\text{опт}}$ используется процедура поиска максимального значения показателя результативности S_b (блоки «19»–«21») внутри цикла, выполняемого с последовательным увеличением числа камер в компоновке БСК (блоки «3»–«22»). Выполнение методики завершается получением оптимального числа камер $b_{\text{опт}}$ (блок «23»).

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО БСК

Исходные данные представлены наборами параметров, описывающих условно-реальные БЛА, оптико-электронную камеру, на основе которой формируются компоновка БСК, заданные к аэрофотосъемке требования и площадной объект мониторинга: $X_{\text{БЛА}} = (V = 150 \text{ км/ч}, \beta_{\text{max}} = 5^\circ, D_{\text{max}} = 1620 \text{ км}, H_{\text{max}} = 6,5 \text{ км}, m_{\text{сух}} = 150 \text{ кг}, m_{\text{взл}} = 195 \text{ кг}, \delta = 0,1);$ $X_{\text{БСК}} = (m_{\text{кам}} = 1,63 \text{ кг}, f = 150 \text{ мм}, a_x = 40 \text{ мм}, a_y = 53,4 \text{ мм}, a_p = 3,76 \text{ мкм}, p_q = 5\%);$ $X_{\text{ТРЕБ}} = (p_x = 60\%, p_y = 30\%, n_x = 2, R' = 0,2 \text{ м});$ $X_{\text{ОБ}} = (D = 100/200/300 \text{ км}, l = 1/2/5/10).$

Значения параметров удаленности площадного объекта и его удлинения рассматриваются в нескольких вариантах для исследования их влияния на состав оптимальной компоновки БСК. Промежуточные результаты расчета параметров аэрофотосъемки и полета БЛА, выполненные для компоновок БСК от одной до шести камер, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры аэрофотосъемки и полета БЛА в зависимости от числа камер

Число камер b	Высота полета H , м	Простр. разрешение R , м	Показатель ухудшения простр. разрешения, r	Полоса захвата l_{yb} , м	Вариант захода на следующий маршрут	Дальность полета D_b , км
1	7748*	0,194	0,97	2676	№ 2	1379
2	7124*	0,179	0,893	4935	№ 1	1321
3	6172	0,155	0,775	6678	№ 3	1264
4	4992	0,125	0,626	7723	№ 3	1207
5	3707	0,093	0,465	7959**	№ 3	1151
6	2451	0,061	0,307	7362	№ 3	1095

* Значения высоты полета, не обеспечиваемые техническими возможностями БЛА.

** Максимальное значение полосы захвата на местности.

По полученным результатам можно судить о том, что в силу заданного ограничения на пространственное разрешение на краю полосы захвата R' с увеличением числа камер снижается высота полета БЛА. При этом рассматриваемый пример показывает, что высота полета, рассчитанная для компоновки из одной и двух камер, не может обеспечиваться выбранным БЛА, имеющим практический потолок полета 6,5 км. Кроме того, из-за снижения высоты полета наблюдается улучшение пространственного разрешения в центре полосы захвата R , а в силу того что пространственное разрешение на краю полосы захвата R' не изменяется, то имеет место снижение показателя ухудшения пространственного разрешения. Так, при компоновке БСК из одной камеры значение показателя r близко к единице (параметры R и R' близки по значению), а при компоновке из пяти камер оно ухудшается более чем в 2 раза, из семи – более чем в 5 раз. В свою очередь, немонокотонную зависимость от числа камер показывает изменение полосы захвата l_{yb} , имеющей в рассматриваемом примере максимальное значение при пяти камерах. В таком случае, если характеризовать процесс аэрофотосъемки съемочной производительностью [7], определяемой сфотографированным за единицу времени количеством площади, то компоновка БСК из пяти камер обеспечит наилучшее значение этого показателя. Кроме того, увеличение числа камер определяет изменение варианта захода на следующий маршрут. В представленном примере большая часть вариантов компоновки от трех до шести камер определяет использование способа захода № 3. Только в случае использования компоновок с малым числом камер наблюдается выбор других способов захода на следующий маршрут, а именно: при одной камере – № 2, при двух камерах – № 1.

По рассчитанным значениям параметров аэрофотосъемки и полета БЛА для всех возможных вариантов компоновки БСК определена потенциальная результативность. Отдельные результаты этого расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценки потенциальной результативности аэрофотосъемки, км²

Дальность до объекта D , км	Число камер в компоновке b	Удлинение площадного объекта l			
		1	2	5	10
100	1	1738,6	1774,7	1752,7	1678,9
	2	3018,8	3030,5	2905,8	2715,9
	3	3847,5	3807,0	3609,1	3253,9
	4	4167,7*	4091,6*	3778,6*	3547,5*
	5	4045,4	3975,0	3673,3	3086,6
	6	3544,3	3475,1	3206,5	2691,8
200	1	1407,4	1441,8	1420,2	1341,4
	2	2416,8	2424,1	2292,9	2071,5
	3	3028,3	2994,1	2778,7	2612,8*
	4	3227,4*	3158,1*	2980,6*	2517,4
	5	3080,9	3017,6	2685,3	2410,1
	6	2648,8	2590,9	2302,8	2066,1
300	1	1079,1	1110,4	1093,9	1050,8
	2	1822,4	1828,5	1696,1	1597,7
	3	2229,6	2200,4	1971,7	1773,5
	4	2309,9*	2251,2*	2064,7*	1860,9*
	5	2135,6	2089,6	1921,2	1385,2
	6	1773,7	1735,8	1596,1	1150,9

*Максимальные значения результативности аэрофотосъемки, соответствующие оптимальному числу камер.

Анализ результатов показывает наличие оптимальной компоновки БСК, при которой обеспечивается максимальная результативность. При большинстве вариантов исходных данных оптимальной является компоновка БСК, включающая четыре оптико-электронные камеры, кроме варианта аэрофотосъемки объекта с удлинением 10, расположенного на удалении

200 км, для которого оптимальная компоновка содержит три камеры. Полученные результаты в первом приближении показывают, что состав оптимальной компоновки обладает малой чувствительностью к размещению и пространственным свойствам объекта аэрофотосъемки.

Анализ рассматриваемого примера показывает, что разработанная методика наряду с определением оптимальной компоновки БСК позволяет получить оценку потенциальной результативности аэрофотосъемки объекта на заданном удалении и определить удлинение объекта, аэрофотосъемка которого может выполняться по наибольшей площади. Судя по полученным результатам, при компоновке БСК с одной или двумя камерами наибольшая результативность наблюдается при аэрофотосъемке объекта с удлинением, равным двум. В других условиях, при компоновке БСК с тремя и более камерами наилучший эффект имеет место при аэрофотосъемке компактного объекта с удлинением, равным единице.

Кроме того, при анализе полученных параметров аэрофотосъемки и полета БЛА (см. табл. 2) отмечено, что наилучшей съемочной производительностью характеризуется компоновка БСК из пяти камер. При этом дальнейшее исследование по показателю результативности свидетельствует, что такое число камер не соответствует оптимальной компоновке БСК. В свою очередь, оптимальная компоновка определена составом из четырех камер, при использовании которой БЛА обеспечивает большую дальность полета по сравнению с вариантом компоновки из пяти камер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика выбора оптимальной компоновки БСК позволяет определить число камер, использование которых обеспечит максимальную результативность аэрофотосъемки заданного удаленного площадного объекта. В рамках методики выполняются расчет интересующих параметров компоновки, проверка возможности использования БЛА для определяемых параметров съемки, а также осуществляется выбор способа захода на следующий маршрут. Расчет показателя результативности осуществляется с помощью полученного аналитического аппарата, позволяющего оценить число маршрутов аэрофотосъемки.

Рассмотренный контрольный пример использования предложенной методики поясняет отдельные этапы ее выполнения и демонстрирует возможность определения оптимальной компоновки БСК. Показаны характер зависимостей определяемых параметров аэрофотосъемки и полета носителя от числа камер в компоновке, а также изменение способа захода на следующий маршрут. Для вариантов компоновок БСК приведены результаты расчета потенциальной результативности, в которых представлено оптимальное число камер. Анализ результатов показал, что для заданных БЛА и камеры состав оптимальной компоновки обладает малой чувствительностью к изменению пространственных свойств объекта съемки.

Полученные результаты целесообразно использовать для решения задач обоснования облика и синтеза беспилотных авиационных систем, предназначенных для аэрофотосъемки площадных объектов. Кроме того, математический аппарат оценивания результативности аэрофотосъемки может использоваться для сравнительного анализа аэрофотосъемочных систем не по отдельным техническим свойствам, а по обобщающему показателю, учитывающему ключевые параметры оборудования и свойства объекта мониторинга.

Список используемых источников

1. Принципы и примеры использования технологии дистанционного зондирования в информационном обеспечении инфраструктур пространственных данных / А.Н. Григорьев, Г.Г. Дмитриков, Т.В. Попович и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – № 664. – С. 51–59.

2. Бабашкин Н.М., Нехин С.С. Топографическая аэросъемка. Современное состояние и перспективы развития // Геодезия и картография. – 2015. – № 7. – С. 36–41.
3. Orych A. Entering the digital era of the Open Skies Treaty // Geography and Cartography. – 2015. – № 64. – P. 65–74. – Doi: 10.1515/geocart-2015-0003.
4. Григорьев А.Н., Комраков Д.Н., Рябчевский В.Ю. Подход к анализу условий аэрофото-съемки с учетом свойств и расположения площадного объекта // Технологии, алгоритмы и программы решения прикладных задач кибербезопасности, помехозащищенности и информационного обеспечения. – 2019. – Вып. 2 (36). – С. 153–159.
5. Руководство по аэросъемочным работам / Ю.И. Полетаев и др. – М.: Воздушный транспорт, 1988. – 336 с.
6. Аэрофотосъемочные работы: справочник аэрофотосъемщика / А.А. Попов, Ю.И. Полетаев, Ю.В. Евдокимов и др. – М.: Транспорт, 1984. – 200 с.
7. Частные показатели эффективности применения беспилотных летательных аппаратов при ведении аэросъемочных работ / А.Н. Григорьев, Г.Г. Дмитриков, Д.А. Дубровин и др. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях». – Иркутск: ИГ СО РАН, 2018. – С. 55–59.

Alekhin S.G., Meshcheryakov S.E., Shemelov V.A. Models of presentation of meteorological information in the intellectual system of automatic control of unmanned aerial vehicles // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 8–17.

The issues of collecting and processing meteorological information on board unmanned aerial vehicles for the correction of flight tasks using artificial intelligence technologies are considered.

Key words: weather conditions, intelligent system, artificial Intelligence, presentation models.

Bova Y.I., Kryukovsky A.S., Lukin D.S. Mathematical modeling of the influence of the Earth's ionosphere on the structure of radio waves in the vicinity of caustics // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 18–22.

The features of modeling the structure of the wave field in the vicinity of caustics that occur in the ionosphere near the earth's surface without taking into account radio waves reflected from the surface are considered. The simulation was performed taking into account the divergence of the radio signal in the ionospheric isotropic plasma and absorption. A comparison is made between a uniform asymptotic solution containing the Airy function and its derivative and a geometrooptic (ray) solution. A caustic field estimation based on the ray approximation is proposed. Calculations were performed for the model of night electronic concentration and frequency of collisions of the mid-latitude ionosphere.

Key words: numerical modeling; propagation; ionosphere; becharacteristic system; rays; caustics, divergence.

Ganzha A.A. To the Trigger Initiation of Lightning by Quantum Structural Filaments // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 23–27.

The article discusses the unique properties of quantum structural filaments (QSF), revealed during experiments [1] on the trigger initiation of lightning. Explains the ability of the QSF to initiate:

- multiple lightning discharges in a post-thunderstorm cell and non-thunderstorm clouds;
- fluxes of fast high-energy electrons, positrons, X-ray and gamma radiation.

Key words: quantum structural filaments, lightning triggering, high-energy electrons, positrons, X-ray, gamma radiation.

Experience of GPR sounding from an air carrier / V.A. Garbatsevich, D.E. Edemskiy, A.V. Popov, I.V. Prokopovich // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 28–33.

Based on the equipment of commercial GPR, a prototype of an airborne subsurface radar was constructed. To select the antenna system, several configurations of the placing of the transmitted and receiving antennas were simulated. A set of preliminary experiments carried out using a tower crane showed the efficiency of the proposed system in the study of subsurface structures of the soil at a sufficient distance from the ground. Numerically calculated model radarograms gave good results compared to field data and help in their interpretation. Natural measurements with GPR equipment, located under the helicopter, confirm the efficiency of the developed hardware and applicability of the airborne GPR for real-world subsurface surveys.

Key words: GPR, georadar, helicopter-borne GPR, helicopter, subsurface probing.

Nonreciprocity effect in quasi-vertical sounding of the / I.A. Yegoshin, E.Y. Zikov, A.A. Kolchev, A.G. Chernov, V.V. Shumaev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 34–38.

The paper considers an automated system for ionosphere sounding by chirp signals. The experimental scheme for quasi-vertical sounding of the ionosphere is described. It has been experimentally shown that there is no reciprocity in the characteristics of the signal propagation when changing the direction of propagation. This effect is explained by the difference in the phase incursion due to the rotation of the polarization plane. The results of numerical simulation are presented.

Key words: model of the radio link, linear frequency modulation, multipath, oblique sounding.

Compensation of the Influence of the Earth's Ionosphere on the Quality of Synthesized Radar Images / A.A. Kalinkevich, B.G. Kutuza, V.Y. Manakov, V.M. Masyuk, V.A. Plyushchev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 39–43.

The analysis of the destructive influence of the ionosphere on the performance of the space radar with a synthesized aperture operating in the P-band and methods for overcoming this influence showed that for the successful use of the ISS-SAR(P) complex of scientific equipment in the space experiment, additional studies of the ionosphere parameters are required. Such investigations can be carried out by creating specialized ground polygons to test the performance of the P-band SAR.

Key words: synthetic aperture radar, Earth's ionosphere, spaceborn SAR resolution, phase-gradient autofocus, active calibrator with specific capabilities.

Kobernik D.A., Nikolskiy V.A., Rudenko V.V. Modeling the Low-frequency Electromagnetic Radiation Parameters in Earth-ionosphere Waveguide Generated by Currents in the Earth Lithosphere // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 44–48.

On the basis the exact solution of Maxwell equations through the Debye potentials in the form of rows of spherical harmonic series for nonuniform ionosphere and the homogeneous Earth in which there is a source of radiation in the form of a horizontal electric dipole the theoretical model was developed for calculation the low-frequency electromagnetic radiation parameters in earth-ionosphere waveguide. As a result of calculations values of electromagnetic fields in a waveguide for a wide range of discrete frequencies of radiation for various depths of source radiation arrangement under the earth surface are presented. It is shown that estimations of Schumann's resonances variations in a waveguide allow to develop and apply this model for monitoring of active actions caused by different global processes in an Earth ionosphere and lithosphere.

Key words: Earth-ionosphere waveguide, seismic activity, Schumann resonance, Maxwell electromagnetic field equation, spherical harmonic series.

Kolesnikov R.V., Sivokon V.P. Dynamical characteristics of field-aligned irregularities in the conditions of ionosphere change // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 49–54.

Ionosphere irregularities make significant impact on the efficiency of radio engineering system functioning. Our investigations carried out on Kamchatka peninsula showed that field-aligned irregularities have a special destructive role for decameter radio systems. Defined expectations in the increase of efficiency of radio engineering systems by active impact on the ionosphere are also associated with them. Speed characteristics are one of the important parameters of such

irregularities. To determine the irregularities speed in an impact area, different approaches are used. For example, aspect scattering method is applied. It determines the speed as a whole but does not allow one to determine vertical and horizontal components, direction of its motion. The developed approach allows us to solve this problem. The observations results of EISCAT experiments in October 2019 are illustrated as an example.

Key words: ionosphere modification, field-aligned irregularities.

Kolomin M.V., Kotonaeva N.G., Mikhailov V.V. Efficiency of correction of ionospheric models on operational information of one station of vertical radio sensing of ionospheric observing network // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 55–60.

The possibility of correcting climate models of the ionosphere based on data from a single observation point equipped with a vertical radiosonde was investigated in order to monitor the Earth's plasma envelope in real time in the vicinity of this measurement tool. SIMP-STANDARD and IRI models were used for research. The probability that the relative deviations of the corrected models will be less than 10% is taken as the criteria for the effectiveness of correcting climate models of the ionosphere. The dimensions of the areas around each ionosonde of the state ionospheric network where it is possible to improve the quality of ionospheric monitoring by correcting the climate model of the ionosphere according to this specific ionosonde are determined.

Key words: correction of ionospheric models, propagation of radio waves, vertical sounding, IRI model, SIMP-STANDARD model.

Savochkin P.V. Model for forming amplitude-phase distribution with aperture of receiving antenna array taking into account disturbances of propagation route in short-wave radar stations // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 61–67.

Results of simulation of amplitude-phase distribution in location of receiving antenna array of short-wave radar stations are presented taking into account path of probing signal propagation/ Analysis of amplitude-phase distribution variation is carried out taking into account width of directional pattern of transmitting antenna.

Key words: radar stations, amplitude-phase distribution, antenna array, propagation path.

Development of convective cloud electrification based on empirical and numerical models / A.M. Abshaev, A.H. Adjiev, N.E. Veremey, Y.A. Dovgalyk, Y.P. Mikhailovsky, V.B. Popov, A.A. Sinkevich, M.L. Toropova // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 68–74.

In this paper, we study the results of numerical modeling of a thunderstorm case in the North Caucasus using a numerical three-dimensional non-stationary convective cloud model. For the first time, the characteristics of the cloud at various stages of electrification are examined in detail. It is shown for the first time that the simulation results correspond to empirical criteria for the electrification of a thundercloud.

Key words: electrification, thunder, numerical model, empirical model.

Analysis of data from long-term atmospheric-electric observations in the North Caucasus region / A.H. Adzhiev, Z.M. Kerefova, A.G. Klovo, T.V. Kudrinskaya, G.V. Kupovy, D.V. Timoshenko, A.A. Cherkesov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 75–79.

Data from long-term observations of atmospheric electricity elements in the Elbrus region are presented. The global representativeness of electric field measurement data is established. Observation points in the high-altitude zone are recommended for monitoring the atmospheric electric field at the global and regional levels.

Key words: Atmospheric electricity, electric field, unitary variation, monitoring, Elbrus.

Alekhin S.G., Ivanov R.D. Defining the boundaries of climatic seasons based on the method of decomposition of field average daily air temperature by natural orthogonal functions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 80–86.

For solving problems of optimal planning of the use of aerospace remote sensing approach to defining the boundaries of climatic seasons based on the method of decomposition of meteorological fields by natural orthogonal functions and correlation analysis coefficients of decomposition. It is shown how to determine long-term time relationships between complex characteristics of the temperature field of the atmosphere, which have se-zone features.

Key words: climate season, natural orthogonal functions, air temperature.

Artyushina A.V., Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M. Influence of 3D cloud effects on intensity of solar radiation in Earth's limb sounding: Results of numerical experiments // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 87–91.

The results of statistical simulation of solar radiation transfer in a spherical atmosphere for a limb-sounding scheme taking into account the effects of the stochastic geometry of liquid-water clouds (visible range) are presented. It has been shown that 3D cloud effects determine the main regularities of the formation of solar radiation brightness fields when changing a perigee height from the level of the underlying surface to the cloud top. A comparison of the intensities in the clear sky, overcast and broken clouds depending on the perigee height and illumination conditions is fulfilled.

Key words: statistical simulation, limb sounding, broken clouds, solar radiation intensity.

Information support of the hydrometeorological service of the Armed Forces of the Russian Federation by the Federal Center for Monitoring the Geophysical Situation / R.L. Akhmedshin, S.V. Zhuravlev, N.G. Kotonaeva, V.T. Minligareev, A.Y. Repin, S.V. Tsenko, V.V. Udrish // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 92–99.

The structure of information support for The armed forces of the Russian Federation and other interested agencies by the Federal information center for the geophysical environment, which operates on the basis of the Institute of Applied Geophysics Rosgidromet is presented.

Key words: monitoring the geophysical situation, databases, data transfer protocol, ionosphere sensing, information products.

Use of data on periodic snow cover variability to validate information on the sensitivity of optical range satellite equipment / B.A. Ashabokov, L.A. Kesheva, G.M. Kruchenitsky, A.A. Tashilova, R.A. Shokuev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 100–103.

The possibility of using snow-covered territories located in the latitudinal zone accessible to observations from manned spacecraft as polygons for monitoring the stability of the response of

satellite-based optical equipment is discussed. The results of testing various bases for describing the seasonal variability of snow thickness are presented. a modeling algorithm is Proposed that excludes the output of model values beyond the physically meaningful limits of the dynamic range of the simulated process and recommendations for the optimal algorithm for constructing an analytical description of this variability. The results of visualization of geographical distribution of parameters of the spectrum of seasonal variability for the southern and North Caucasus Federal districts are presented.

Key words: calibration of satellite optical equipment, monitoring the sensitivity of satellite optical equipment, polygons, snow cover, seasonal and long-term variability of snow cover.

Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S. Magnetic zenith effect under modification of the high latitude upper ionosphere by extraordinary polarized powerful HF radio waves // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 104–108.

We present experimental results concerning the aspect angle dependence of the HF heater beam on the intensity of artificial ionosphere disturbances in the high latitude ionosphere F-region induced by the extraordinary polarized powerful HF radio waves. It was found that the most intense artificial disturbances are excited under HF pumping along the magnetic field line (towards the magnetic zenith).

Key words: high latitude ionosphere, powerful HF radio wave, polarization, magnetic zenith, incoherent scatter radar.

Borisov A.A., Kuleshov Y.V., Makov A.B. Method for diagnosing the surface pressure field in a meteorologically unlit physical and geographical area // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 109–116.

A method has been developed for diagnosing the surface pressure field in areas that are insufficiently illuminated in hydrometeorological terms, using previously estimated geopotential fields on standard Isobaric surfaces of 850 GPa, 700 mbar, and 500 mbar. The results of evaluating the quality of the developed method are presented, indicating that it can be used in the work of operational and predictive units of the Hydrometeorological service of the Armed Forces of the Russian Federation.

Key words: hydrometeorological support, diagnostics of the ground pressure field in areas not covered by meteorological data.

Borisov A.A., Makov A.B., Suvorov S.S. The model index of the efficiency Hydrometeorology maintenance for the solution of problems of forecasting of hydrometeorological conditions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 117–122.

A methodology for assessing the effectiveness of solving hydrometeorological problems is presented. It is proposed to use the probability of solving the corresponding problem of hydrometeorological support as an indicator of effectiveness. Obtaining estimates of the corresponding performance indicator is difficult to implement in the classical statement of the problem. The sought probability of solving the problem is proposed to be approximated by a certain distribution function, estimating the distribution parameters from archived data on the quality of the developed forecasts of the hydrometeorological situation.

Key words: effectiveness of hydrometeorological support, forecasting of hydrometeorological conditions, logit regression.

Bryukhanov I.D., Loktyushin O.Y., Samokhvalov I.V. Estimation of the frequency and conditions of formation of specular contrails according to the polarization laser sensing data // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 123–127.

The microstructure of contrails belonging to high-level clouds of anthropogenic origin in climate atmosphere models cannot be taken into account correctly without clarifying the formation mechanisms of aerosol particles in contrails and the transformation of their characteristics over time. In the present work, the results of a study of temporal transformation of the contrail microstructure with the unique high-altitude polarization lidar developed at National Research Tomsk State University are described. The formation repeatability of contrails with a predominant horizontal orientation of ice crystals leading to anomalous backscattering of optical radiation is estimated.

Key words: laser sensing, polarization lidar, backscattering phase matrix, high-level clouds, contrails, specular scattering.

Microwave radiometric investigations of atmospheric water vapor and cloud liquid water contents / V.Y. Bykov, G.N. Ilyin, D.M. Karavaev, G.G. Shchukin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 128–132.

There are discussed methodology of ground-based microwave radiometry to determine of integrated water vapor and cloud liquid water contents and some results of recent microwave experiments 2018 in St. Petersburg region using the dual channel water vapor radiometer of IPA RAS, located in the geophysical observatory Lehtusi. Perspectives of application of the water vapour radiometers for problems of applied meteorology are discussed.

Key words: geophysical observatory, water vapor radiometer, brightness temperature, water vapor, cloud liquid.

Status and prospects of works development to protection against frosts / A.A. Bychkov, V.P. Korneev, N.A. Platonov, A.V. Chastuhin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 133–138.

The present work is devoted to the problem of combating such a dangerous phenomenon for agriculture as frost. In the Soviet Union, serious attention was paid to this problem and a search was conducted for a solution to this problem. In the last three decades, these works are practically not carried out. This article is an attempt to draw attention to this important issue. An analysis of methods and technical means to combat frost is carried out, using the developed three-dimensional mathematical model, numerical experiments on the spread of an aerosol cloud for specific meteorological situations that occur during frosts, taking into account the orography of the area, were performed, an information-measuring system for controlling frost control was developed. Elements of the system passed field tests in the Republic of Crimea.

Key words: frost, agriculture, forecast, exposure methods, smoke generator.

Determination of precipitation sums by satellite data for part of the European territory of Russia / E.V. Volkova, A.V. Kukharsky, E.L. Muzylev, Z.P. Startseva // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 139–145.

The Automated Specialized Processing Package (ASPP) “ETR-plus” has been developed for estimating daily, monthly and annual precipitation in vast territories from satellite data. The basis of the package is the original Complex Threshold Technique (CTT) for detecting clouds and identifying its types from radiometer AVHRR/NOAA, MSU-MR/Meteor-M No 2 and SEVIRI/Meteosat data. Using CTT daily precipitation amounts are calculated from information on the maximum instantaneous precipitation intensity within each pixel. Then monthly and annual sums are calculated for the corresponding time intervals when summarizing this daily precipitation. The accuracy of the calculation of all these sums is verified by comparing the satellite-derived estimates with the ground-based measurement data, and this accuracy rises with increase of the time interval for summing precipitation. The study was carried out on the example of part of the Central Black Earth Region of the European territory of Russia with area of 227300 km². The fields of precipitation amounts formed with the help of ASPP can be used for modeling water and heat regimes of the territories under study.

Key words: ASPP “ETR-plus”; daily, monthly and annual precipitation; CTT; AVHRR/NOAA, MSU-MR/Meteor-M, SEVIRI/Meteosat; LSM model for calculating soil water content and evapotranspiration.

Convective structures detection method using weather satellites based on neural network / I.A. Gotur, A.N. Meshkov, M.Y. Rud, I.A. Yaremenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 146–151.

The definition of overshooting tops is a key to identifying severe convective structures. In article a method of detecting overshooting tops using neural network Mask R-CNN is considered. Only satellite imagery was used as input data. The probability of detecting was 50-70%, the false alarm rate was 45-55%. The conducted researches showed that further development of the method is promising. The authors proposed the main directions for its improvement.

Key words: machine learning, artificial neural networks, meteorology, weather satellites, overshooting top, convective structure, severe storm.

Prospects for application of machine learning technologies for processing hydrometeorological information / I.A. Gotur, A.N. Meshkov, M.Y. Rud, I.A. Yaremenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 152–159.

The article considers approaches to the use of machine learning technologies in the system of hydrometeorological support. The necessity to consider new technologies is caused by insufficient accuracy, insufficient adaptability to geographical features, as well as overly complex integration of new data in existing approaches: statistical and hydrodynamic. Also, machine learning technologies can be used to find new relationships and extract new knowledge from existing data.

Key words: machine learning, artificial neural networks, meteorology, automation of hydrometeorological information processing.

Denisenkov D.A., Zhukov V.Y., Shchukin G.G. Detection of vertical air drafts by radar methods // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 160–165.

The modern weather radar capabilities to detection by the hydrometeors vertical motion associated with microbursts and updrafts inside powerful cumulonimbus clouds are analyzed. The peculiarities applications of the estimations of mean radial velocity of particles, the absolute value of cross-correlation coefficient of polarization constituents of received signal, spectrum width

received reflections are considered. The conclusion about the prospects of using the last of these parameters is made.

Key words: meteorological radar, vertical air drafts, hazardous weather detection.

Didenko K.A., Pogoreltsev A.I. Study of stationary planetary waves interactions using MUAM data // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 166–170.

A methodology for studying of interactions between stationary planetary waves and stationary planetary waves with the mean flow is shown. This approach based on an analysis of the different terms contribution to the perturbed potential enstrophy balance equation (Ertel's potential vorticity squared). Using the Middle and Upper Atmosphere Model (MUAM), these terms were calculated for the winter, when a sudden stratospheric warming (SSW) was observed/simulated. The results are presented in the form of latitude-height cross sections and the strengthening of nonlinear interactions before the onset of warming as well as during its development in the upper stratosphere is shown.

Key words: stationary planetary wave, mean flow, enstrophy, vorticity, sudden stratospheric warming.

Method for predicting a rise in water level / A.N. Efremenko, N.O. Moiseeva, V.S. Potemkin, V.V. Chernyy // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 171–175.

The report discusses the contents of the forecast method for raising water levels in the border and transboundary regions of the Russian Federation. The forecast of the water level rise is made using the method of the corresponding levels and tested on the data of the hydrological posts of the Ussuri River - a tributary of the Amur River, where in July-September 2013 there was a catastrophic flood caused by prolonged heavy rainfall. For forecasting rain floods a simplified version of the technique is proposed that is used in calculating the parameters of rain floods from small catchments and used in the design of roads and access facilities.

Key words: river level rise, rain floods, forecast method, morphometric characteristics of the basin, automated software and hardware complex.

Formation of the atmospheric electric field daily variations near the earth's surface in different meteorological conditions / B.G. Zainetdinov, A.G. Klovo, T.V. Kudrinskaya, G.V. Kupovykh, D.V. Timoshenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 176–180.

Abstract A mathematical model of the mechanism for generating diurnal variations of the electric field in a turbulent surface layer due to changes in the global electric current is constructed. The dependence of the phase shift of surface layer electric field oscillations relative to variations of the total current in the atmosphere on the degree of turbulent mixing is studied. The theoretical calculations are in good agreement with the data of observations of the electric field at polar stations.

Key words: Electric field, current, turbulent diffusion, surface layer.

Zolotukhina O.I. Thermodynamic conditions favorable to the formation of hazardous convective phenomena over the «Vostochny» cosmodrome // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 181–187.

The paper presents the spatio-temporal variability of thunderstorm activity in the study area. A comparative analysis of the instability indices calculated for the days with a thunderstorm in conjunction with a shower and the shower separately has been conducted. We determined the thresholds of instability indices at which the state of the atmosphere is divided into «a shower during a thunderstorm» or «shower». The results are applicable to develop alternative methods for predicting hazardous convective phenomena within a radius of 200 km above the «Vostochny» cosmodrome territory, in addition for the preparation of carrier rockets for a launch.

Key words: «Vostochny» cosmodrome, atmospheric convection, shower, thunderstorm, instability indices.

Dynamics of the spectrum of atmospheric-electric and meteorological sizes of the ground layer during the rain / V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, P.M. Nagorskiy, M.V. Oglezneva, K.N. Pustovalov, S.V. Smirnov, D.E. Filatov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 188–194.

During intense rainfall caused by the passage of thick convective clouds, a study was made of the spectral composition of variations in the meteorological and atmospheric-electric parameters of the surface atmosphere. For the *Cb* series, accompanied by intense rainfall, the wavelet spectra of high-frequency (with periods of less than 10 minutes) variations in the structure of precipitation (in intensity and diameter) were analyzed, as well as consistent variations between the flow of hydrometeors, polar conductivities λ_{\pm} and potential gradient $\nabla\phi$ electric field *E*.

Key words: thunderstorms, rainfall, electric field strength, polar conductivity.

Echeloned monitoring of agricultural crops in the forest-steppe of the Samara region / V.G. Kaplin, T.V. Kornilov, D.A. Kochin, V.G. Fedchenko, E.F. Chichkova // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 195–199.

The analysis of data from the echeloned monitoring of the experimental field of the Samara State Agrarian University in the vicinity of the village Ugorye, Kinel'sky district. Vegetation indices were calculated based on data from the WorldView-3 satellite survey, synchronous descriptions of the weed distribution in triticale (xTriticosecale) crops, measurements of the spectral reflectivity of the crop and dominant weed species. The features of the spatial distribution of vegetation indices depending on the state and weed distribution in crops of the experimental field are revealed. The ways of research in the field of echeloned monitoring of crops are outlined.

Key words: echeloned monitoring, spectral radiance, satellite data, vegetation indices, ground-based observations.

Kleshcheva T.I., Permyakov M.S., Potalova E.Y. Monitoring of typhoons on base of the Worldwide lightning location network data // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 200–206.

The paper presents methods for estimation of characteristics of the cloud wall of typhoons (the position of its center, radius, radii of the inner and outer borders, width) according to the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) on the northwestern Pacific Ocean 2011–2015. The cloud wall characteristics of 39 typhoons were compared with the coordinates of the centers, the radii of the maximum wind and eye, obtained from the remote sensing data (scatterometer ASCAT), the Japan Meteorological Agency (JMA) and the American Joint Typhoon Warning Center (JTWC).

Key words: tropical cyclones, typhoons, eyewall, radius of maximal wind, typhoons eyewall radius, lightning, thunderstorms localization networks, thunderstorm density of discharges.

Kopytenko Y.A., Latysheva O.V., Petrova A.A. The influence of fault zones of the earth's crust on the evolution of the thickness and edge of the Arctic ice sheet // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 207–211.

The results of the study of the earth's crust deep faults influence on the melting of the Arctic Ocean ice cover are discussed. Satellite observations of the state of the ice cover were studied and a comprehensive interpretation of gravity anomalies, magnetic anomalies, seismic and seismological data was completed. It was shown that fluid supply channels make a significant contribution to the localization of seasonal thawing of perennial ice and the configuration of the boundaries of old and annual ice.

Key words: satellite observations of ice cover, ice thickness, fluid supply channel.

Korneev O.Y. Synoptic and statistical diagnosis of the surface baric field over the Arctic ocean in conditions of limited initial hydrometeorological information // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 212–216.

Using the developed classification of surface level pressure (SLP) above Arctic for 1948-2010 on base Natural orthogonal function method and developed physic-statistical models for restoration SLP above Arctic ocean into account for SLP above Arctic coast for each type the accuracy of the restoration SLP meaning above Arctic ocean was increased 2-3 times for different location of the drift HM-bouys.

Key words: hydrometeorological support, surface level pressure, orthogonal function method, physic-statistical models.

Korystin A.A., Kuleshov Y.V. Approach to analysis of the ionosphere observability over difficult accessible territories for space monitoring systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 217–222.

In the interest of assessing the potential for diagnosing the ionosphere using space systems, the formulation of the problem of analyzing the ionosphere observability over hard-to-reach territories for space-based observing facilities is proposed. Possible ways to solve the problem using the scientific and methodological apparatus of the mathematical theory of systems are determined.

Key words: diagnostics, ionosphere, observability, distributed dynamic system, systems approach, space systems.

Kuleshov V.P., Mitnik L.M., Mitnik M.L. Global fields of Earth's brightness temperature in the range of 6-190 GHz from Meteor-M No.2 and No.2-2 satellite measurements // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 223–228.

Physical factors influencing the outgoing microwave (MW) radiation of the Earth – on its brightness temperature T_B – are considered. The brightness temperature of the underlying surface is determined by spatial variations of the surface emissivity and temperature T , and T_B of the atmosphere - by variations of vertical profiles of air pressure, temperature and humidity, phase composition and water content of clouds and precipitation. In 2014 – 2017, the global T_B (ν) fields were measured by the Meteor-M No. 2 MTVZA-GY scanning radiometer simultaneously in 29 spectral channels in the frequency range $\nu = 6–190$ GHz [1]. Since August 2019, measurements are carried out in 31 channels from Meteor-M No. 2-2 [2]. The joint analysis of microwave data, satellite visible and infrared images, ground meteorological measurements and synoptic maps

allows estimating the contribution of individual surface and atmospheric parameters to $T_B(v)$. The use of the results of the MW radiative transfer modeling significantly improves the correct interpretation of the $T_B(v)$ spatial variations.

Key words: microwave sensing, MTVZA-GYA, Meteor-M No 2-2, global data, brightness temperature, absorption, water vapor, clouds, vertical temperature profile, emissivity, ocean, wind, land covers.

Lobanov K.A. Diagnostics of the ionosphere geophysical tasks to ensure the functioning of technical systems control of space objects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 229–233.

The article considers a radiophysical method for diagnosing the state of the ionosphere based on the registration of signals from GLONASS/GPS space navigation systems using reference ionospheric models and reference full electronic content (TEC) of the plasmosphere, which allows to reduce the error in determining the parameters of the ionospheric layers, for ionospheric maintenance of radio engineering systems for monitoring objects in outer space.

Key words: radio engineering system, space object, ionosphere model, plasmosphere model, radiophysical method, space navigation system, full electronic content.

Lukyanova R.Y. Numerical simulation of the electron density distribution in the F-region polar ionosphere // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 234–238.

A numerical model of the F-region high latitude ionosphere is intended for the operational calculation of the 3D distribution of electron concentration (Ne) depending on the helio-geophysical conditions. The effect of electric fields of magnetospheric convection on the distribution of electron concentration is taken into account. In the electric field calculation block, the convection trajectories are modeled depending on the input parameters: interplanetary magnetic field, solar wind speed, day of the year, universal time, level of geomagnetic and solar activity. In the ionospheric block, the altitude distribution of Ne in the convecting plasma tube is calculated. The generalized molecular ion and the O⁺ ion are taken into account. The model adequately reproduces the main large-scale irregularities of the polar ionosphere.

Key words: polar ionosphere, electron concentration, electric field, plasma convection, mathematical modeling.

Panchuk A.V. Program for spectroscopic measurements of moisture content in the Earth's day and night atmosphere // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 239–244.

A method for determining the moisture content in the Earth's night and day atmosphere was developed using astronomical spectrographs.

Key words: high-resolution spectra, modeling, precipitate water.

Petrochenko V.M., Shuleikin V.N., Shchukin G.G. Accounting the noise effects of relative humidity and atmospheric pressure in atmospheric-electric monitoring of geological heterogeneities and geodynamic processes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 245–249.

The connections of atmospheric electric field and field conductivity of air with relative humidity and atmospheric pressure are presented. Their continuous control in solving the problems of

atmospheric-electric monitoring of geological heterogeneities and areas of geodynamic processes will increase interference with the result.

Key words: atmospheric electric field, field conductivity, relative humidity, atmospheric pressure.

Calibration of microwave radiometric system for a radio thermal radiation of the atmosphere / I.N. Rostokin, E.A. Rostokina, E.V. Fedoseeva, G.G. Shchukin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 250–255.

The article considers the conditions for implementing the calibration of a microwave radiometric system with compensation for the influence of background noise on the radio thermal radiation of a cloudless atmosphere. The results of angular measurements of radiothermal radiation of the atmosphere are presented, according to which the system calibration parameters are calculated for various angles of the place without compensation (by the signal of the main measuring channel) and with compensation for the influence of background noise (by the difference output signal of the system).

Key words: microwave radiometric system, calibration for a radio thermal radiation of the atmosphere, the compensation of background noise.

Semenov V.V. Atmospheric transparency model for optical-electronic systems of the "looking" type in the spectral range of 8-12 microns // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 256–262.

Modern optoelectronic systems have functional limitations related to the absorption and scattering of electromagnetic radiation by the atmosphere. For such systems to work properly, it is necessary to evaluate the influence of the atmosphere through its characteristics, the main one being the transparency of the atmosphere. The paper considers a model of molecular absorption of electromagnetic radiation by water vapor for thermal imaging systems of the "looking" type operating on surface routes in the wavelength range of 8-12 microns.

Key words: atmospheric transparency, atmospheric transparency coefficient, thermal imaging system, molecular absorption, aerosol attenuation.

Yaremenko I.A. Method of distributed processing of meteorological information based on artificial neural network technologies // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 263–270.

The article describes a method that allows to predict the time of beginning and end of the dangerous phenomenon of weather (fog) with advance warning from 10 minutes to 6 hours. To make the forecast, a trained model of an artificial neural network is used, which, based on data on the state of meteorological conditions for the past 3 hours, predicts the presence or absence of a weather hazard (NFAT), as well as the time of beginning and duration of the event.

Key words: neural networks, distributed information processing, machine training, meteorological information.

Small lightning-direction finders and range finders antenna / I.A. Gotur, E.A. Korovin, Y.D. Ovchinnikov, I.E. Usupov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 271–275.

Based on an analysis of the existing designs of lightning-direction finders and range finders and estimates of the influence of noise on the accuracy of determining the coordinates of a lightning

discharge, options for reducing the dimensions of the electric and magnetic antennas are substantiated.

Key words: lightning, direction finder, range finder, electric antennas, magnetic antennas.

Methodology for selecting the optimal layout of optical-electronic onboard complex in the task of aerial monitoring of an area object / A.N. Grigor'ev, V.V. Zajcev, D.N. Komrakov, N.V. Maseev, V.Y. Ryabchevsky // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 674: Problems of Military Applied Geophysics and Control of Natural Environment. – P. 276–286.

The applied problem of monitoring a remote area object using aerial photography tools implemented on the basis of unmanned aerial vehicles is discussed in the article. In particular, the possibility of optimizing the onboard special complex formed on the basis of the layout of optoelectronic cameras is being investigated. A method for selecting the optimal layout of the onboard complex, based on the developed analytical apparatus for modeling the means and process of aerial photography is suggested. The novelty of the developed mathematical apparatus consists in describing the features of forming the camera layout, taking into account the loss of shooting time from performing u-turns for entering the next route, and in obtaining an analytical dependence of the number of shooting routes on the parameters that characterize the conditions of aerial photography. The result of the method is to determine the number of cameras in the configuration of the onboard complex, in which the maximum performance is provided in specific conditions of aerial photography. To confirm the feasibility of the method, the results of calculating the control example are presented, showing the existence of an optimal configuration of the onboard complex.

Key words: area object, aerial photography, unmanned aerial vehicle, optical-electronic camera, onboard special complex, optimization.

Абшаев Али Магометович, доцент, ведущий научный сотрудник НПЦ «Антиград» (360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 198); доктор физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (8662) 403761, e-mail: abshaev.ali@mail.ru

Аджиев Анатолий Хабасович, заведующий отделом стихийных явлений Высокогорного геофизического института (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (8662) 40-19-16, e-mail: adessa1@yandex.ru

Алёхин Сергей Григорьевич, начальник 55-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: 2670368@rambler.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

Ахмедшин Рафис Лутфархманович, старший научный сотрудник ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); тел.: 8-499-181-36-22, e-mail: akhmedshin@ipg.geospace.ru

Ашабоков Борис Азреталиевич, заведующий отделом 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

Благовещенская Наталья Фёдоровна, главный научный сотрудник – заведующая лабораторией радиофизических исследований ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (921) 303-88-15; e-mail: natalya@aari.nw.ru

Бова Юлия Игоревна старший преподаватель Института информационных систем и компьютерных технологий автономной некоммерческой организации высшего образования «Российский новый университет» (Россия, Москва, ул. Радио, 22); тел.: 8 (964) 585-23-73, e-mail: julia_bova@mail.ru

Борисов Алексей Анатольевич, заместитель начальника 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-52.

Борисова Татьяна Дмитриевна, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (921) 752-80-41; e-mail: borisova @aari.ru

Брюханов Илья Дмитриевич, ассистент Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36), младший научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); тел.: 8 (952) 882-41-94, e-mail: plyton@mail.tsu.ru

Быков Владимир Юрьевич, научный сотрудник Института прикладной астрономии Российской академии наук (197110, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 8); тел.: 8 (812) 275-09-91, e-mail: igen@iaaras.ru

Бычков Алексей Александрович, зам. директора АНО «Агентство атмосферных технологий» (127055, Россия, Москва, Новослободская ул., 3, корп. 3, эт./пом. 3/15), кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (916) 525-33-92, e-mail: bychkov.aleks@gmail.com

Веремей Николай Евгеньевич, ведущий научный сотрудник Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (812) 297 86 73, e-mail: veremey@gmail.com

Волкова Елена Викторовна, старший научный сотрудник ЕЦ ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”» (Россия, 123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); кандидат географических наук; e-mail: asmus@planet.iitp.ru; тел.: 8 (499) 795-21-37; e-mail: quantocosa@bk.ru

Ганжа Алексей Александрович, ведущий научный сотрудник Института сверхвысоко-частотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5); тел.: 8 (985) 764-61-08, e-mail: daoganzha@rambler.ru

Гарбацевич Владимир Алексеевич, старший научный сотрудник магнитной обсерватории Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (108840, Россия, Москва, г. Троицк, Калужское ш., 4); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (903) 591-74-43, e-mail: про@mail.ru

Готюр Иван Алексеевич, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mail.ru

Григорьев Андрей Николаевич, начальник 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

Денисенков Дмитрий Анатольевич, преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 35); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (905) 219-59-16, e-mail: dimasden@yandex.ru

Диденко Ксения Андреевна, аспирант Санкт-Петербургского государственного университета (198504, Россия, Санкт-Петербург – Петродворец, ул. Ульяновская, 1); тел.: 8 (921) 555-84-72, e-mail: didenko.xeniya@yandex.ru

Довгалюк Юлия Александровна, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7); кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник; тел.: 8 (812) 297-86-73, e-mail: dovgaluk35@mail.ru

Егошин Иван Александрович, аспирант Марийского государственного университета (424000, Россия, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1); тел.: 8 (927) 872-25-06, e-mail: jungl91@mail.ru

Едемский Дмитрий Евгеньевич, старший научный сотрудник лаборатории дифракции радиоволн в ионосфере Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (108840, Россия, Москва, г. Троицк, Калужское ш., 4); кандидат технических наук; тел.: 8 (919) 967-25-50, e-mail: deedemsky@gmail.com

Ефременко Александр Николаевич, начальник научного отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-74, geofiz_svu@mail.ru

Жуков Владимир Юрьевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 35); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (921) 998-12-06, e-mail: vuzhukov2002@list.ru

Журавлев Сергей Владимирович, заведующий отделом ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8-499-181-36-22, e-mail: zhuravlev@ipg.geospace.ru

Журавлева 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

Зайнетдинов Булат Гаянович, заведующий лабораторией Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7); e-mail: bulatoss@yandex.ru

Зайцев Владимир Валентинович, преподаватель 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 570-64-32, e-mail: SIC@guar.ru

Золотухина Ольга Ивановна, главный специалист геофизического отдела филиала АО «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова» (111024, Россия, Москва, ул. Пруд Ключики, 12А); кандидат географических наук; тел.: 8 (925) 064-00-36, e-mail: Zolot_ol@mail.ru

Зыков Евгений Юрьевич, доцент кафедры радиоастрономии Института физики Казанского федерального университета (420008, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 16а); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (937) 525-00-27, e-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

Иванов Роман Дмитриевич, помощник начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-95-19, e-mail: vka@mil.ru

Ильин Геннадий Николаевич, руководитель Отделения радиоастрономических наблюдений Института прикладной астрономии Российской академии наук (191187, Россия, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10); кандидат физико-математических наук; тел.: 8-(812)-275-09-91, e-mail: igen@iaaras.ru

Калинкевич Анатолий Анатольевич, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (103907, Россия, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7); кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (916) 850-59-50, e-mail: kalinkevich@cplire.ru

Калишин Алексей Сергеевич, ведущий научный сотрудник – заведующий отделом геофизики ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); кандидат технических наук; тел.: 8 (905) 267-46-91; e-mail: askalishin@aari.ru

Кальчихин Владимир Викторович, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (634021, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); кандидат физико-математических наук; тел.: 8(3822)49-20-24, e-mail: vvk@imces.ru

Каплин Владимир Григорьевич, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (196608, Россия, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, 3); доктор биологических наук, профессор; тел.: +7 (931) 237-71-27, e-mail: ctenolepisma@mail.ru

Караваяев Дмитрий Михайлович, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: dm.karavaev@mail.ru

Керефова Залина Музариновна, научный сотрудник лаборатории атмосферного электричества ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); кандидат физико-математических наук; тел.: 89604263599, e-mail: zknyazkb-su@mail.ru

Кешева Лара Асировна, старший научный сотрудник ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); кандидат физико-математических наук, доцент.

Клещёва Татьяна Игоревна, старший научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); кандидат географических наук; тел.: 8 (423) 231-1400, e-mail: tit@poi.dvo.ru

Клово Александр Георгиевич, доцент Южного федерального университета (347900, ГСП 17-А, Россия, г. Таганрог, Некрасовский пер., 44); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (928) 122-10-64, e-mail: klovo_ag@mail.ru

Коберник Дмитрий Александрович, начальник лаборатории ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ (141307, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2^б); кандидат технических наук; тел.: 8 (985) 259-29-77.

Кобзев Алексей Анатольевич, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (634021, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); кандидат технических наук; тел.: 8(3822)49-20-24, e-mail: kaa@imces.ru

Колесников Роман Валерьевич, ведущий научный сотрудник ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ (111123, Россия, Москва, пр. Свободный, 4); кандидат технических наук; e-mail: na-trit@mail.ru

Коломин Максим Вадимович, младший научный сотрудник Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); тел.: 8 (499) 181-50-90, e-mail: kolominmax@mail.ru

Колчев Алексей Анатольевич, доцент кафедры радиоастрономии Института физики Казанского федерального университета (420008, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 16а); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (927) 680-23-02, e-mail: kolchevaa@mail.ru

Комраков Дмитрий Николаевич, адъюнкт кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: 070_503@mail.ru

Копытенко Юрий Анатольевич, директор Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН» (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. 5, лит. Б); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 323-78-45 e-mail: office@izmiran.spb.ru

Корнеев Виктор Петрович, научный руководитель АНО «Агентство атмосферных технологий» (127055, Россия, Москва, Новослободская ул., 3, корп. 3, эт./пом. 3/15); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 252-02-41, e-mail: kornvp@mail.com

Корнеев Олег Юрьевич, заместитель начальника Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (199106, Россия, Санкт-Петербург, В.О. 23-я линия, 23 А); заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (904)604-21-51, e-mail: secretary@meteo.nw.ru

Корнилов Тимур Викторович, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений, (196608, Россия, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, 3); тел.: (812) 470-53-84, e-mail: tvkornilov@mail.ru

Коровин Евгений Александрович, преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (905) 279-95-961, e-mail: evgen_korovin@mail.ru

Корыстин Александр Александрович, докторант Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 590-10-30, e-mail: geoalex2003@mail.ru

Котонаева Надежда Геннадьевна, заместитель заведующего отделом Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (499) 181-36-22, e-mail: kotonaeva@ipg.geospace.ru

Кочин Дмитрий Александрович, научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); тел.: +7 (911) 749-55-30, e-mail: dimakohin@yandex.ru

Крученицкий Григорий Михайлович, заведующий лабораторией атмосферного мониторинга ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (141700 Россия, Долгопрудный,

ул. Первомайская 30); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (495) 408-61-41, e-mail: omd@cao-rhms.ru

Крюковский Андрей Сергеевич научный руководитель института информационных систем и компьютерных технологий автономной некоммерческой организации высшего образования Российский новый университет (Россия, г. Москва, ул. Радио, 22); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (903) 245-31-57, e-mail: kryukovsky56@yandex.ru

Кудринская Татьяна Владимировна, ассистент кафедры физики Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ (347928, Россия, г. Таганрог, Некрасовский пер., 44, Д-405); кандидат физико-математических наук; тел.: 8(8634)371617, e-mail: tvkudrinskaya@sfedu.ru

Кулешов Владимир Павлович, научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: 8 (423) 2312-854, e-mail: 986022@mail.ru

Кулешов Юрий Владимирович, заместитель начальника Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского по учебной и научной работе (197198, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-52, e-mail: kuleshov_y@mail.ru

Куповых Геннадий Владимирович, профессор Южного федерального университета (347900, ГСП 17-А, Россия, г. Таганрог, Некрасовский пер., 44); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (928) 954-36-42, e-mail: kupovykh@sfedu.ru

Кутуза Борис Георгиевич, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН (103907, Россия, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (916) 615-33-21, e-mail: kutuza@cplire.ru

Кухарский Александр Викторович, заведующий лабораторией ЕЦ ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”» (Россия, 123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 7); тел.: 8 (499) 255-69-89; e-mail: asmus@planet.iitp.ru); e-mail: kuha@mail.ru

Латышева Ольга Владимировна, ведущий инженер Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкина РАН» (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. 5, лит. Б); тел.: 8 (812) 323-78-45.

Лобанов Константин Александрович, начальник лаборатории (научно-исследовательской) Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 436-28-12, e-mail: austin1978@yandex.ru

Локтюшин Олег Юрьевич, магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); тел.: 8 (3822) 41-39-84, e-mail: lega.lega123@mail.ru

Лукин Дмитрий Сергеевич, профессор Института информационных систем и компьютерных технологий автономной некоммерческой организации высшего образования «Рос-

сийский новый университет» (Россия, Москва, ул. Радио, 22); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (916) 115-21-03, e-mail: luknet1@yandex.ru

Лукьянова Рената Юрьевна, ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН (117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (495) 333-52-12, e-mail: renata@aari.ru

Маков Александр Борисович, доцент 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-52.

Манакон Валерий Юрьевич, ведущий инженер акционерного общества «Концерн радиостроения "Вега"» (121170, Россия, Москва, Кутузовский пр., 34); тел.: 8 (499) 249-07-04, e-mail: mail@vega.su

Масеев Никита Васильевич, курсант 551-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); тел.: 8 (812) 347-95-51.

Масюк Владимир Михайлович, научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (103907, Россия, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (953) 310-96-71, e-mail: masyuk77@mail.ru.

Мешков Алексей Николаевич, преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Мещеряков Станислав Евгеньевич, помощник начальника отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Минлигареев Владимир Тимурович, заместитель директора по научной работе ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); доктор технических наук, доцент; тел.: 8-499-181-39-66, e-mail: metrology@ipg.geospace.ru

Митник Леонид Моисеевич, главный научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); доктор физико-математических наук; тел.: (423)2312-854, e-mail: lm_mitnik@poi.dvo.ru

Митник Майя Львовна, старший научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); кандидат технических наук; тел.: (423) 2312-854, e-mail: maia_mitnik@mail.ru

Михайлов Вадим Валерьевич, старший научный сотрудник Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 181-37-14, e-mail: vadim.svet1320@yandex.ru

Михайловский Юрий Павлович, ведущий научный сотрудник Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (812) 297-86-73, e-mail: yupalych@yandex.ru

Моисеева Наталья Олеговна, доцент кафедры авиационной метеорологии и экологии Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 704-15-80, natali.ziadinova@yandex.ru

Музылев Евгений Львович, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3); кандидат физико-математических наук; e-mail: info@iwp.ru; тел.: 8(499)1355403; e-mail: muzylev@iwp.ru

Нагорский Пётр Михайлович, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (634055, Томск, пр. Академический, 10/3); профессор ФГАОУ ВО «Томский государственный университет» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (3822) 49-15-65, npm_sta@mail.ru

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

Никольский Василий Александрович, старший научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ (141307, Россия, Московская обл, г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2^б); кандидат технических наук; тел.: 8 (926) 148-53-35.

Овчинников Юрий Дмитриевич, инженер Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Оглезнева Мария Викторовна, инженер ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (634021, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); тел.: 8 (3822) 49-26-81, e-mail: oglezneva.m@yandex.ru

Панчук Ася Владимировна, аспирант ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (355017, Россия, Ставропольский край, Ставрополь, ул. Пушкина, 1); тел.: 8 (8652) 95-68-08, e-mail: info@ncfu.ru; инженер ФГБУН «Специальная астрофизическая обсерватория РАН» (369167, Россия, КЧР, Зеленчукский р-н, п. Нижний Архыз); тел.: 8 (87878) 46-336, e-mail: admsao@sao.ru; тел.: 8 (928) 922-44-13; e-mail: panchukasya@gmail.com

Пермяков Михаил Степанович, заведующий лабораторией взаимодействия океана и атмосферы Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (423) 231-14-00, e-mail: office@izmiran.spb.ru., p_gehon@mail.ru

Петрова Алевтина Александровна, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН» (199034,

Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. 5, лит. Б); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (812)-323-78-45 e-mail: aa_petrova@inbox.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

Платонов Николай Александрович, ведущий инженер АНО «Агентство атмосферных технологий» (127055, Россия, Москва, Новослободская ул., 3, корп. 3, эт./пом. 3/15); тел.: 8 (916) 738-60-30, e-mail: ceylon123@mail.ru

Плющев Виктор Алексеевич, заместитель Генерального конструктора акционерного общества «Концерн радиостроения "Вега"» (121170, Россия, Москва, Кутузовский пр., 34); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 753-40-04 (доб. 10-17), e-mail: mail@vega.su

Погорельцев Александр Иванович, профессор Российского государственного гидрометеорологического университета (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (921) 944-75-04, e-mail: apogor@rshu.ru

Попов Алексей Владимирович, главный научный сотрудник лаборатории дифракции радиоволн в ионосфере Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (108840, Россия, Москва, г.Троицк, Калужское ш., 4); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (910) 400-91-07, e-mail: popov@izmiran.ru

Попов Виктор Борисович, научный сотрудник Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (812) 297-86-73, e-mail: qoower@gmail.com

Поталова Екатерина Юрьевна, научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); кандидат географических наук; тел.: 8 (423) 231-14-00, e-mail: gata@poi.dvo.ru

Потемкин Валерий Сергеевич, курсант Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13); тел.: 8(812) 347-97-74, potemkin.valera@icloud.com

Прокопович Игорь Валерьевич, научный сотрудник лаборатории дифракции радиоволн в ионосфере Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (108840, Россия, Москва, г. Троицк, Калужское ш., 4); тел.: 8 (926) 539-46-61, e-mail: prokop@izmiran.ru

Пустовалов Константин Николаевич, научный сотрудник ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (634055, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); доцент ФГАОУ ВО «Томский государственный университет» (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 49-15-65, const.pv@yandex.ru

Репин Андрей Юрьевич, директор ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); доктор физико-математических наук, доцент; тел.: +7(499)187-81-86, e-mail: director@ipg.geospace.ru

Ростокин Илья Николаевич, профессор кафедры УиКТС Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (920) 944-15-84, e-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

Ростокина Елена Анатольевна, доцент кафедры УиКТС Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (920) 925-78-72, e-mail: arostockina@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, преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Рябчевский Владимир Юрьевич, курсант 551-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); тел.: 8 (812) 347-95-51.

Савочкин Павел Владимирович, заместитель начальника 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 272-56-73.

Самохвалов Игнатий Викторович, зав. кафедрой Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (3822) 41-39-84, e-mail: lidar@mail.tsu.ru

Семёнов Вячеслав Валерьянович, адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 584-71-42, e-mail: semslav2007@rambler.ru

Сивоконь Владимир Павлович, главный научный сотрудник Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (684034, Россия, Камчатский край, Елизовский р-н, с. Паратунка, ул. Мирная, 7); профессор кафедры ЭУЭС КамчатГТУ (683003, Россия, Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (914) 626-47-25, e-mail: vsivokon@mail.ru

Синькевич Андрей Александрович, главный научный сотрудник Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7); доктор технических наук; старший научный сотрудник; тел.: 8 (812) 297-86-73, e-mail: sinkevich51@mail.ru

Смирнов Сергей Васильевич, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (634021, Россия, Томск, пр. Акаде-

мический, 10/3); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 49-26-81, e-mail: smirnov@imces.ru

Старцева Зоя Пантелеймоновна, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3); кандидат географических наук; e-mail: info@iwp.ru); тел.: 8(499)1355403; e-mail: starzoya@yandex.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) 347-96-52.

Тасенко Сергей Викторович, начальник Управления геофизического мониторинга, активных воздействий и государственного надзора Росгидромета (125993, Москва, ГСП-3, Нововаганьковский пер., 12); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 255-68-77, e-mail: s.tasenko@meteorf.ru

Ташилова Алла Амарбиевна, зав. лабораторией ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); кандидат физико-математических наук, доцент.

Тимошенко Дмитрий Владимирович, доцент кафедры высшей математики Института компьютерных технологий и информационной безопасности ЮФУ (347928, Россия, г. Таганрог, Некрасовский пер., 44, Д-402); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (8634) 37-17-05, e-mail: dmitrytim@yandex.ru

Торопова Марина Леонидовна, младший научный сотрудник Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7); тел.: 8 (812) 297-86-73, e-mail: marina-toropova@mail.ru

Удриш Владимир Викторович, начальник Гидрометеорологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации (119160, Россия, Москва, Фрунзенская набережная 22/2); тел.: 8 (495) 498-19-66.

Федосеева Елена Валерьевна, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (905) 144-42-06, e-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Федченко Владимир Григорьевич, доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); кандидат технических наук; тел.: +7 (921) 962-24-26, e-mail: fedchenko.v@bk.ru

Филатов Дмитрий Евгеньевич, инженер ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН» (634021, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); тел.: 8 (3822) 49-20-24, e-mail: dmitrii.04101995@gmail.com

Частухин Андрей Викторович, зам. директора АНО «Агентство атмосферных технологий» (127055, Россия, Москва, Новослободская ул., 3, корп. 3, эт./пом. 3/15); кандидат физико-математических наук; тел. 8 (916) 257-69-61, e-mail: a.chastuhin@mail.ru

Черкесов Аслан Артурович, аспирант ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Нальчик, пр. Ленина, 2); тел.: 8 (988) 932-32-27, e-mail: cherkesov2018@yandex.ru

Чернов Александр Геннадьевич, ведущий специалист ООО «СИТКОМ» (424000, Россия, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1); тел: 8 (903) 326-74-37, e-mail: chalexr@mail.ru

Черный Виктор Васильевич, старший научный сотрудник научного отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(812) 347-97-74, vchernyy1956@gmail.com

Чичкова Елена Фёдоровна, директор ЦКУ «КосмоИнформ-Центр» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); кандидат географических наук; тел.: 8 (904) 642-08-95, e-mail: ef-chichkova@yandex.ru

Шемелов Владимир Александрович, профессор 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

Шокуев Рафаэль Артурович, магистр кафедры систем, устройств и методов геокосмической физики Московского физико-технического института (141700, Россия, Москва, г. Долгопрудный).

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

Шумаев Владимир Васильевич, начальник отдела разработок ООО «СИТКОМ» (424000, Россия, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1); тел: 8 (987) 715-83-25, e-mail: shvvladimi@mail.ru

Щукин Георгий Георгиевич, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 35); доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; e-mail: ggshchukin@mail.ru

Юсупов Игорь Евгеньевич, ведущий инженер управления технического обеспечения образовательных программ СПбГУ (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9); кандидат физико-математических наук

Яременко Иван Андреевич, адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mail.ru

Алёхин Сергей Григорьевич, начальник 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52.

Григорьев Андрей Николаевич, начальник 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-51.

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.

Жуков Владимир Юрьевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 35); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (921) 998-12-06.

Краснов Валерий Михайлович, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52.

Маков Александр Борисович, доцент 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-52.

Щукин Георгий Георгиевич, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 35); доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.: 8 (812) 347-95-52.