

**Т Р У Д Ы**  
**ВОЕННО-КОСМИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ**  
**имени А. Ф. Можайского**

Под общей редакцией  
доктора технических наук,  
профессора **Ю. В. Кулешова**

В ы п у с к 653

**Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля  
состояния природной среды**

*Издается с 1942 года*



Санкт-Петербург  
2016

Р е д к о л л е г и я:

председатель **Ю.В. Кулешов**, доктор техн. наук, проф.;  
зам. председателя **И.В. Сахно**, доктор техн. наук, проф.;  
ответственный секретарь **С.Г. Алёхин**, кандидат техн. наук, доц.;

**Н.Ф. Аверкиев**, доктор техн. наук, проф.; **В.Ф. Алексеев**, доктор техн. наук, доц.;  
**Т.В. Алексеев**, доктор истор. наук, доц.; **А.П. Алёшкин**, доктор техн. наук, проф.;  
**В.Н. Арсеньев**, доктор техн. наук, проф.; **И.Ю. Еремеев**, доктор техн. наук, проф.;  
**М.А. Еремеев**, доктор техн. наук, проф.; **А.И. Замарин**, доктор техн. наук, проф.;  
**В.Н. Калинин**, доктор техн. наук, проф.; **В.В. Клейменов**, доктор техн. наук, проф.;  
**В.В. Козлов**, доктор техн. наук, проф.; **Н.С. Кужекин**, кандидат филос. наук, проф.;  
**В.Н. Кузьмин**, доктор воен. наук, проф.; **Н.Б. Кунтурова**, доктор пед. наук, проф.;  
**А.Г. Ломако**, доктор техн. наук, проф.; **Г.Н. Мальцев**, доктор техн. наук, проф.;  
**Ю.С. Мануйлов**, доктор техн. наук, проф.; **Т.О. Мысливцев**, доктор техн. наук;  
**А.В. Паршуткин**, доктор техн. наук, доц.; **Г.Д. Петров**, доктор техн. наук, проф.;  
**Н.А. Репях**, кандидат филос. наук, доц.; **А.В. Харченко**, доктор техн. наук, доц.;  
**К.Ю. Цветков**, доктор техн. наук, проф.; **А.В. Чарушников**, доктор воен. наук, доц.

Ответственный за выпуск:  
начальник РИО **С.В. Чернышёв**

Техническая поддержка:  
**Н.А. Станкевич**

**Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 653.** Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды / под ред. Ю.В. Кулешова; редкол.: Ю.В. Кулешов, И.В. Сахно, С.Г. Алёхин и др.; ответственный за вып.: С.В. Чернышёв; техническая поддержка: Н.А. Станкевич. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 231 с.

Настоящий выпуск является тематическим. Представленные в нем статьи подготовлены по материалам IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», посвященной 80-летию Метеорологического факультета, исторического предшественника кафедры технологий и средств геофизического обеспечения и отдела исследований гидрометеорологических процессов.

Материалы сборника могут быть полезны специалистам в области геофизики, физики атмосферы, гидрометеорологии, радиофизики, радиоастрономии, а также курсантам (студентам), адъюнктам (аспирантам) и докторантам соответствующих специальностей.

© ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016

---

Подписано к печ. 17.09.2016  
Гарнитура Times New Roman  
Уч.-печ. л. 58,00

Формат печатного листа 445×300/4  
Уч.-изд. л. 28,75  
Заказ 3295  
Бесплатно

---

Типография ВКА имени А.Ф. Можайского

«Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского» зарегистрированы Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором).  
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).  
Адрес редакции: 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13; тел.: 8 (812) 347-97-69; <http://trudvka.ru>

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Абрамочкин В.Н., Красненко Н.П.</i> Возможности исследования и прогнозирования мезомасштабных метеорологических полей в пограничном слое атмосферы.....	7
<i>Алексеев В.Ф., Гурьев И.С., Копытенко Ю.А., Лабецкий П.В., Петрова А.А.</i> Анализ высотных моделей магнитного поля Земли, используемых для геофизического и навигационного обеспечения летательных аппаратов.....	11
<i>Ахметов О.И., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Суворова З.В., Федоренко Ю.В.</i> Численное моделирование распространения низкочастотных электромагнитных сигналов в волноводе Земля-ионосфера.....	16
<i>Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.</i> О некоторых методах повышения точности статистических моделей D-области ионосферы.....	21
<i>Бисярин М.А.</i> Нелинейное распространение акустического сигнала в неоднородном волноводном канале .....	25
<i>Бубукин В.И., Бубукин И.Т.</i> Характеристики микропузырькового слоя в двухслойной модели морской поверхности как индикатор величины теплового потока на границе море – атмосфера .....	29
<i>Быков А.В., Шихов А.Н.</i> Оценка достоверности прогноза мезомасштабных конвективных систем в Пермском крае с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования.....	33
<i>Готюр И.А., Рудь М.Ю.</i> Математическая модель автоматизированной системы обработки информации, поступающей с метеорологических искусственных спутников Земли .....	38
<i>Дворецкая И.В., Захаров В.М., Крученицкий Г.М., Романов Р.Г.</i> Особенности использования распределения Гиббса при моделировании атмосферных систем с переменным числом частиц.....	43
<i>Ефременко А.Н., Моисеева Н.О., Подковырин А.Н., Черный В.В.</i> Применение современных технологий гидродинамического прогнозирования в интересах гидрометеорологического обеспечения ВС РФ .....	47

### СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ

<i>Бахметьева Н.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е.</i> Исследование природных явлений в нижней ионосфере Земли методом искусственного воздействия на нее .....	52
---	----

<i>Благовещенская Н.Ф.</i> Модификация высокоширотной ионосферы мощным КВ радиоизлучением нагревного комплекса EISCAT/Heating.....	56
<i>Болдырев М.С., Желавский С.А., Никольский В.А.</i> Оценка возможности применения эффекта ракурсного рассеяния радиоволн для мониторинга работы нагревного стенда HAARP с территории Российской Федерации...	63
<i>Бычков А.А., Петрунин А.М., Частухин А.В.</i> Мобильная система активных воздействий с целью искусственного увеличения осадков.....	67
<i>Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е., Терещенко Е.Д.</i> Влияние солнечного затмения 20 марта 2015 года на распространение сверхнизкочастотных радиоволн с частотой 82 Гц на высокоширотной трассе.....	71
<i>Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л.</i> Наблюдения отклика на модификацию нижней ионосферы нагревным стендом СУРА в вариациях мезосферного озона...	75
<i>Лебедев Н.В., Руденко В.В.</i> Применение нагревных стендов для защиты космических аппаратов от высокоэнергичных частиц искусственных радиационных поясов .....	79
<i>Фролов В.Л.</i> Результаты измерений характеристик искусственных электромагнитных и плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы Земли с помощью искусственного спутника Земли DEMETER.....	83
<b>СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ</b>	
<i>Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Казакова С.Т., Кулиев Д.Д.</i> Вариации напряженности электрического поля атмосферы при грозах.....	87
<i>Алексеев А.А., Жадковский А.В., Кудрявцев С.В., Чапурский Л.И., Шилин Б.В.</i> Методы спектральных исследований фонов и целей в интересах информационного обеспечения средств технического зрения.....	92
<i>Артюшина А.В., Журавлёва Т.Б., Насртдинов И.М., Русскова Т.В.</i> Закономерности формирования уходящего солнечного излучения в полях разорванной облачности .....	96
<i>Баранюк А.В., Кулешов В.П., Митник Л.М., Митник М.Л., Чернявский Г.М., Чёрный И.В.</i> Микроволновое зондирование различных климатических зон Земли со спутника «Метеор-М» № 2.....	101
<i>Буката В.А., Варющенко С.Б., Косырев С.В., Найданов А.Ф.</i> К вопросу о радиолокационном наблюдении радиоактивных атмосферных образований...	107
<i>Григорьева О.В., Жуков Д.В.; Марков А.В., Мочалов В.Ф., Николенко А.А.</i> Возможности использования много- и гиперспектральной аппаратуры в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра для классификации мелководной части морей .....	111
<i>Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В.</i> Обнаружение объектов, заглубленных в подстилающей поверхности Земли, при помощи низкочастотного радиоизлучения.....	116

<i>Кондратьев С.А., Рыжиков Д.М., Тимофеев А.С., Чичкова Е.Ф.</i> Идентификация типов подстилающей поверхности для оценивания территорий по данным спутниковой съемки LANDSAT-8 на примере водосбора реки Нарвы .....	121
<i>Петроченко В.М., Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г.</i> Атмосферно-электрический поиск подземных инженерных сооружений .....	126
<i>Самохвалов И.В.</i> Дистанционная диагностика микроструктуры перистых облаков: проблемы и перспективы .....	133
<b>ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ</b>	
<i>Андреев М.А., Ильин М.Ю., Клочков Д.В., Коняев М.А.</i> Оптические и радиолокационные средства контроля метеопараметров и аэрозольно-газового состава атмосферы .....	137
<i>Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Корнеев А.Н. Пушков А.А.</i> Перспективные доплеровские метеорологические радиолокаторы со сжатием широкополосных сигналов.....	141
<i>Вылегжанин И.А., Жуков В.Ю., Караваев Д.М., Щукин Г.Г.</i> Развитие метода пассивно-активной радиолокации для задач штормоповещения .....	146
<i>Горелик А.Г., Ермилов Д.В., Калмыков В.М., Кононов М.А., Куликовский К.В., Стерлядкин В.В., Хомяков А.В., Ширшов Н.В.</i> Натурные измерения ветрового поля с помощью радиолокационных станций $K_A$ диапазона и интерпретация сложных сигналов.....	151
<i>Гусев А.В., Иванов В.Э., Кудинов С.И., Плохих О.В., Ширшов Н.В.</i> Направления развития отечественных систем радиозондирования атмосферы военного и гражданского назначения .....	155
<i>Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Сивак О.А., Щукин Г.Г.</i> Верификация метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала .....	159
<i>Денисенков Д.А., Коровин Е.А.</i> Универсальный датчик системы мониторинга грозовой активности .....	164
<i>Дроздов А.Е., Жильцов Н.Н.</i> Современное состояние и перспективы развития технических средств гидрометеорологического обеспечения Военно-морского флота.....	169
<i>Ефременко Д.С., Сероухова О.С.</i> К вопросу о влиянии дискретности измерений на статистические характеристики временных рядов метеорологических величин .....	175
<i>Захаров А.И., Калинин А.А., Кутуза Б.Г., Смирнов Ю.В., Стасевич В.И., Турук В.Э.</i> Перспективы применения космического радиолокатора с синтезированной апертурой Р-диапазона в комплексе с радиолокатором с синтезированной апертурой L/S-диапазонов.....	180

<i>Калинников В.В., Тertyшников А.В., Удриш В.В.</i> Зондирование интегрального содержания водяного пара радиосигналами глобальных навигационных спутниковых систем и ионосферы в Нальчике в марте – мае 2015 года.....	185
<i>Карелин А.В., Саворский В.П., Салихов Р.С., Смирнов М.Т. Туманов М.В.</i> Перспективный подход к созданию космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций .....	190
<i>Клочков Д.В., Коняев М.А., Михайленко А.С.</i> Оптоэлектронный датчик измерения высоты нижней границы облачности и параметров атмосферы в приземном слое.....	194
<i>Краснов В.М., Кулешов Ю.В.</i> Повышение точности измерений скорости ветра звуковым анемометром при образовании вихревой дорожки из-за обдува датчиков .....	199
<i>Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.</i> Сверхвысокочастотная радиометрическая система с внешним тестовым шумовым сигналом.....	204
Рефераты статей.....	209
Сведения об авторах.....	219
Сведения о рецензентах.....	231

В.Н. Абрамочкин \*

*кандидат техн. наук;*

Н.П. Красненко \*\*,

*доктор физико-математических наук, профессор*

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

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

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

Рассматриваются возможности созданного аппаратно-программного комплекса мониторинга метеорологической обстановки на ограниченной территории. Комплекс включает в себя различные метеорологические измерители параметров приземного и пограничного слоев атмосферы, основу которых составляют акустические локаторы, программное обеспечение, реализующее две модели прогноза. Анализируются подходы к построению сети измерительной системы и методы прогнозирования метеообстановки.

Ключевые слова: метеорология, атмосферный пограничный слой, мониторинг, прогнозирование, измерительная сеть.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время актуальна проблема текущего мониторинга метеорологического состояния приземного и пограничного слоев атмосферы (АПС) на определенной территории. Также важна проблема численного пространственного и временного оперативного прогнозирования характеристик метеорологических полей и турбулентности в АПС над заданной территорией в условиях минимума исходной метеорологической информации.

Для отработки указанных проблем был создан макет аппаратно-программного комплекса (АПК) мониторинга АПС, пространственного и временного прогнозирования температурно-ветровых полей в приземном и пограничном слоях атмосферы и проведены его испытания [1].

### **СТРУКТУРА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

Аппаратно-программный комплекс (АПК) состоит из макетной сети дистанционных и локальных метеорологических измерителей, расположенных в трех пространственно разнесенных точках (ИС1–ИС3), программно-алгоритмического комплекса (ПАК), системы передачи данных и серверной станции (рис. 1).

В каждой точке макетной сети проводятся измерения метеорологических величин и характеристик турбулентности. После этого по каналам системы передачи данных результаты измерений передаются на сервер, где аккумулируются в хранилище данных. Переданные данные из хранилища с помощью программного модуля загружаются в ПАК, где происходит их дальнейшая обработка. Результаты расчета данных отображаются на мониторе.

В качестве основного метеорологического измерителя характеристик турбулентности и температурно-ветровой стратификации атмосферы используется трехкомпонентный доплеровский акустический локатор (содар) [2, 3]. Он имеет так называемую «мертвую зону» измерений до высоты примерно 30 м. Для определения характеристик турбулентности и метеорологических параметров в приземном слое атмосферы используются локальные метеорологические измерители.

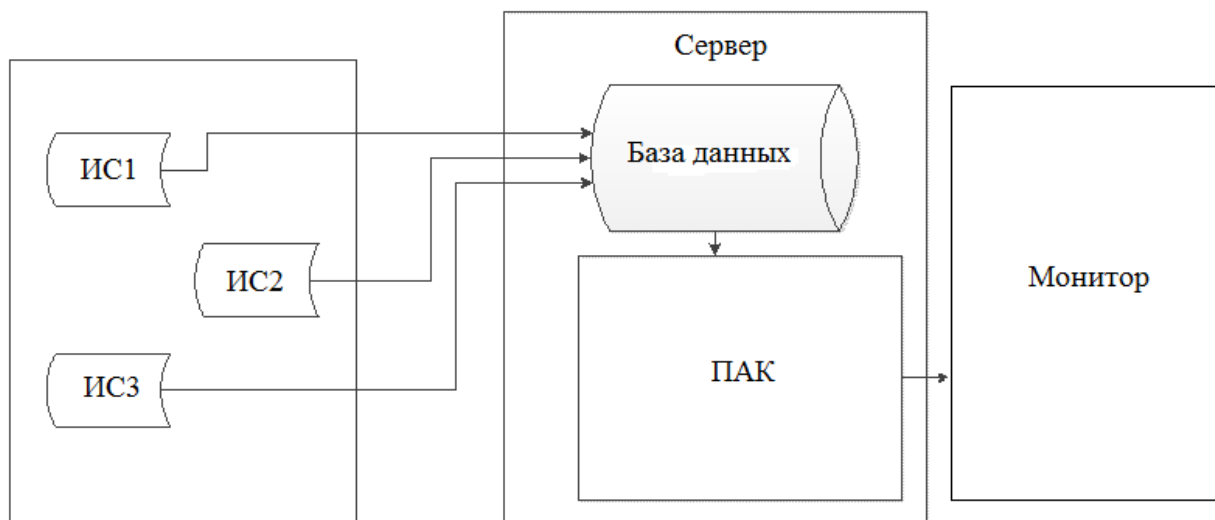


Рис. 1. Структурная схема АПК

В АПК используются два вида ПАК: ПАК-1, работающий на основе модели WRF – Weather Research and Forecasting, и ПАК-2, работающий на основе динамико-стохастической модели с использованием линейной фильтрации Калмана. С их помощью и проведена апробация работы АПК.

ПАК, в свою очередь, состоит из блока усвоения исходных данных, блока подготовки сеточных данных по заданной территории, блока подготовки начальных и граничных данных расчета, основного расчетного блока и блоков анализа и визуализации результатов расчета.

Программно-алгоритмический комплекс ПАК-1, разработанный ИФА РАН, обеспечивает усвоение характеристик подстилающей поверхности, приземных метеопараметров, данных акустического и микроволнового зондирования от сети наземных пунктов с последующей пространственной интерполяцией. Комплекс предназначен для численного восстановления, пространственного и временного прогнозирования температуры и скорости ветра в АПС.

Программно-алгоритмический комплекс (ПАК-2), реализующий динамико-стохастическую модель, разработан в виде многофункциональной профессионально-ориентированной вычислительной системы, обеспечивающей решение следующих функциональных задач (рис. 2):

- пространственной экстраполяции (интерполяции) температуры, составляющих скорости ветра в приземном и пограничном слоях атмосферы, осуществляемой по результатам оперативного дистанционного акустического зондирования в точку с заданными координатами;
- сверхкраткосрочного (с заблаговременностью до 12 ч) прогнозирования параметров состояния атмосферы (температура, составляющие скорости ветра), выполняемого на основе оперативных данных дистанционного акустического зондирования для заданного района;
- пространственной экстраполяции вертикального профиля метеорологической величины с восстановлением значений на высотных уровнях, где данные измерений искажены или отсутствуют.

## ИСПЫТАНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Проведены натурные испытания АПК с двумя видами ПАК на двух полигонах: в окрестностях г. Томска и г. Москвы.

Проведенная проверка функционирования с использованием программно-алгоритмического комплекса ПАК-1 показала, что применение процедуры усвоения данных ди-



станционного зондирования о скорости и направлении ветра приводит к улучшению точности прогноза поля ветра до  $\pm 2$  м/с. Для достижения более лучших показателей точности восстановления для расстояний до 100 км необходимо дополнительное использование в модели ПАК-1 данных о профиле температуры и значениях приземных параметров атмосферы.

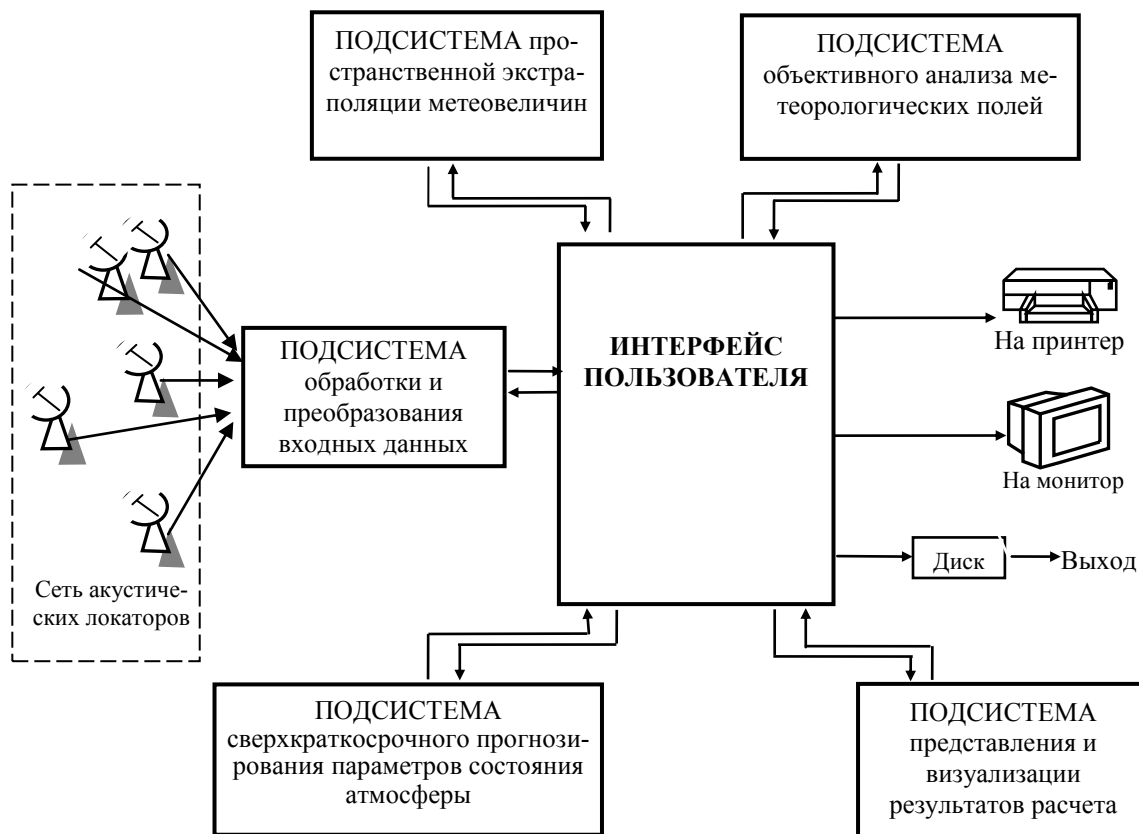


Рис. 2. Обобщенная схема программно-алгоритмического комплекса ПАК-2

ПАК-2 позволяет восстанавливать и прогнозировать поля метеорологических параметров: скорости ветра (три компоненты), температуры, – со следующими характеристиками:

дальность экстраполяции в горизонтальной плоскости .....	до 100 км;
высота слоя экстраполяции .....	до 2 км;
заблаговременность прогноза.....	до 12 ч;
диапазоны изменения скоростей движения воздуха:	
горизонтальное движение .....	0,2–30 м/с;
вертикальное движение .....	$\pm 2$ м/с;
точность прогнозирования .....	$\pm 2$ м/с;
достоверность прогноза .....	0,8.

Работа всех ПАК осуществляется с помощью интерфейса пользователя. Таким же образом осуществляется и вывод результатов расчета на монитор, принтер, а также на жесткий диск, с которого предполагается в дальнейшем реализовать процедуру передачи полученных результатов в качестве первичных параметров для более сложных комплексов на основе гидродинамических моделей, либо по каналам связи потребителям прогностической информации. Главное окно интерфейса состоит из двух областей. Одна область позволяет выводить результаты экстраполяции в табличном виде. Вторая область позволяет визуализировать как сам географический полигон, так и метеорологическую ситуацию по периметру выбранного полигона. Карта позволяет увидеть метеорологическую обстановку в целом, в то время как в таблице отображаются полученные данные в развернутом виде.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан макет аппаратно-программного комплекса мониторинга состояния приземного и пограничного слоев атмосферы, позволяющий:

- измерять вертикальные профили характеристик турбулентности в АПС;
- измерять температурно-ветровую стратификацию атмосферы в АПС;
- осуществлять численное пространственное и временное оперативное прогнозирование метеорологических полей в АПС над заданной территорией. Проведенная апробация работы АПК подтвердила возможность прогнозирования профилей температуры и скорости ветра в пограничном слое атмосферы на расстояниях до 100 км.

### Список используемых источников

1. *Красненко Н.П., Клименко А.Н., Раков А.С.* Аппаратно-программный комплекс акустического мониторинга метеорологической обстановки на ограниченной территории // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2014. – №6. – С.6.
2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. – Томск, 2001. – 278 с.
3. Технические средства для исследования приземной атмосферы и распространения звуковых волн / Н.П. Красненко, А.Н. Кудрявцев, Д.С. Раков, П.Г. Стафеев // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 2. – С. 158–164.

В.Ф. Алексеев,

*доктор техн. наук;*

И.С. Гурьев,

*доктор техн. наук;*

Ю.А. Копытенко\*,

*доктор физико-математических наук, профессор;*

П.В. Лабецкий,

*кандидат техн. наук;*

А.А. Петрова\*,

*кандидат физико-математических наук*

\* СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург.

## **АНАЛИЗ ВЫСОТНЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО И НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Рассматривается роль высотных моделей магнитного поля Земли для решения геофизических задач и навигационного обеспечения летательных аппаратов. Показаны результаты анализа неоднородностей глубинного строения земной коры в структуре магнитных аномалий по данным высотных измерений. Приведены примеры использования высотных карт магнитного поля с целью поиска полезных ископаемых в геотермальных районах Центральной Европы и Северной Америки, в зоне месторождений железистых кварцитов Балтийского щита и месторождений углеводородов в нефтегазоносных бассейнах Татарстана, Сибири, Баренцева, Средиземного и Северного морей.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, навигационная информативность высотных моделей, полезные ископаемые, летательные аппараты.

Одним из источников информации, используемым для геофизического и навигационного обеспечения, является магнитное поле Земли (МПЗ). Представление постоянной части МПЗ и его «векового хода» чаще всего осуществляется с помощью сферического гармонического ряда Гаусса, от количества членов которого зависит точность модели МПЗ [1].

Геофизическое обеспечение на основе сопоставления значений высотной модели МПЗ и магнитометрических измерений, проводимых на различных типах летательных аппаратов (ЛА), в наземных магнитных обсерваториях и на вариационных станциях, в комплексе с измерениями других физических параметров позволяет оценивать и прогнозировать состояния процессов, происходящих как в околоземном пространстве и нижней мантии Земли (землетрясения, ядерные взрывы, нарушения радиосвязи, влияния возмущений МПЗ на жизнедеятельность человеческого организма и т.д.), так и на Солнце и других планетах.

Магнитное поле Земли играет важную роль в НО подвижных объектов (наземных, морских, летательных аппаратов), оснащенных магнитной навигационной системой. Качество НО летательных аппаратов существенно зависит от точности высотных моделей магнитного поля Земли и точности бортовых магнитометрических систем определения ориентации и навигации (МСООН) [2, 3].

МСООН используются совместно с другими навигационными системами (инерциальной, спутниковой, радиолокационной и др.), установленными на ЛА, для повышения качества навигационного обеспечения ЛА. Они имеют следующие преимущества перед существующими навигационными системами: высокие автономность, помехозащищенность и надежность, малые габаритные характеристики и небольшое энергопотребление, высокую стойкость к ударным и вибрационным перегрузкам, а также отсутствие ограничений на угловые перемещения ЛА и возможность использования этих систем в любое время года.

Основным элементом МСООН, от характеристик которого зависит ее точность, является магнитометрический измеритель (магнитометр). В качестве примера можно привести совре-

менный отечественный трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, обладающий следующими основными характеристиками: диапазоном измерений  $\pm 100000$  нТл; разрешающей способностью менее  $0,05$  нТл; абсолютной погрешностью измерений менее  $2$  нТл; полочной частот от  $0$  до  $100$  Гц; энергопотреблением менее  $2,5$  Вт; массой менее  $300$  г [4]. Точностные характеристики такого магнитометра позволяют потенциально обеспечить определение ориентации ЛА с ошибкой менее одной угловой минуты.

В ряде случаев, для повышения точности магнитометрических измерений, например при съемке МПЗ, феррозондовые магнитометры могут комплексироваться с квантовыми магнитометрами. Абсолютная точность и разрешающая способность современных квантовых магнитометров составляют менее  $0,01$  нТл [3, 5].

Точность МСООН также зависит от качества решения следующих основных задач.

Первой задачей является разработка методов учета и компенсации собственных магнитных помех ЛА. В настоящее время накоплены результаты отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований по компенсации и учету собственных магнитных помех подвижных объектов. Военно-космическая академия (ВКА) имени А.Ф. Можайского внесла большой вклад в решение этой задачи. Ею были проведены исследования и предложены способы уменьшения влияния магнитных полей подвижных объектов с использованием, в частности, ферромагнитных и сверхпроводящих сферических экранов. Предложенные способы дают возможность уменьшить влияние собственных магнитных помех подвижных объектов на магнитометрические измерения, что позволило уменьшить ошибку измерений до  $1$  нТл [6, 7].

Второй задачей является разработка методов уменьшения отрицательного влияния возмущений МПЗ (магнитных бурь). Известно, что величины амплитуд возмущений МПЗ растут с увеличением магнитной широты от экватора к Северному и Южному полюсу и могут достигать значений более чем несколько сотен нанотесл, что, в свою очередь, может увеличить ошибки измерений МСООН до недопустимых значений.

Анализ результатов съемок МПЗ, имеющего большую амплитуду возмущений, с использованием космических аппаратов (КА) показывает, что на орбите средний размер области возмущений МПЗ по протяженности занимает не более  $20^{\circ}$ . При этом на одной орбите КА, как правило, таких возмущенных областей не более одной. Вероятность появления магнитных бурь с индексами магнитной активности  $K = 9$  и  $K = 8$  в течение года не превышает  $0,06$ . В годы, когда магнитная активность минимальна, такой интенсивности вообще не наблюдается.

Из анализа возмущений МПЗ следует, что наиболее благоприятной областью для решения задач навигационного обеспечения ЛА является приэкваториальная область в пределах широт от  $-30$  до  $+30^{\circ}$ . В этой области отклонение вектора индукции МПЗ не превышает  $1-3$  угловых минут в течение времени, составляющего  $70\%$  от года [3].

В академии имени А.Ф. Можайского разработаны адаптивные статистические методы оценивания параметров вектора состояния ЛА. Эти методы позволяют повысить точность МСООН в условиях действия больших уровней возмущений МПЗ, а также компенсировать влияние собственных магнитных помех ЛА.

Предварительные результаты моделирования функционирования МСООН, проводившегося в условиях действия возмущений МПЗ, показывают, что возможно достижение потенциальных точностей, характеризующихся ошибками определения углового положения ЛА от  $1$  до  $3$  угловых минут, а определения его координат – ошибками, составляющими менее нескольких десятков метров. Для достижения таких точностей предлагались отключение сигналов коррекции измерительных средств МСООН от входа инерциальной навигационной системы и перевод ее в режим «Память» при появлении возмущений МПЗ очень большой интенсивности. При снижении уровня возмущенности МПЗ предлагалось повторное подключение магнитометрических измерителей к входу инерциальной навигационной измерительной системы.

Следует также отметить, что одной из закономерностей МПЗ является уменьшение его информативности (градиента) с удалением от источников его образования, т.е. с увеличением высоты полета ЛА. Поэтому наибольшей точности МСООН, установленных на КА, можно достичь на низких орбитах с высотами 300–500 км, а для МСООН на воздушных летательных аппаратах – на самых допустимых малых высотах полета.

Впервые измерения МПЗ для построения его высотной модели были проведены на третьем советском КА. Затем они были выполнены на зарубежных КА. За прошедшее время для построения высотной модели МПЗ был осуществлен ряд запусков отечественных КА («Космос-26», «Космос-49», «Космос-321», «Болгария-1300»), на которых размещалась магнитометрическая аппаратура. С 1987 года запуски отечественных КА для съемки МПЗ не проводились. Позднее разрабатывались новые проекты, направленные на исследования МПЗ, но, к сожалению, они не осуществились [8].

Последняя отечественная высотная модель МПЗ (1980–1990) с учетом «векового хода» позволяла определять составляющие вектора индукции МПЗ и его модуля на расстоянии до 40000 км от поверхности Земли в МПЗ [9]. Об ошибках этой модели можно судить по данным в п. 1.3 работы [9] – «при длине ряда 10–13 гармоник погрешность вычисления геомагнитного поля на поверхности Земли составляет 2%...». На основании таких данных об ошибках с учетом «векового хода» МПЗ ошибки определения углового положения ЛА на высотах от 500 до 3000 км могут достигать значения более  $2^{\circ}$ .

За рубежом регулярно проводились и проводятся высокоточные съемки МПЗ с использованием КА (*КА Pogo, Explorer, Маринер, MagSat, Swarm, Champ, Эрсмед*) [10]. Для повышения точности магнитометрических измерений на некоторых КА совместно используются скалярные и векторные магнитометры. Через каждые 5 лет, начиная с 1975 года, строятся глобальные международные высокоточные модели (IAGA) МПЗ с учетом его «векового хода». Оценка аппроксимации осредненных параметров данной модели характеризуется величиной ошибки порядка 0,1 нТл [11]. Такие модели с учетом используемых на борту КА высокоточных магнитометрических и астронавигационных средств, а также GPS позволяют определять угловые параметры КА с высокой точностью.

Зарубежные КА предназначались не только для построения глобальных моделей МПЗ, но и для решения других задач. Например, КА *Magsat* предназначался для решения задачи коррекции региональных магнитных карт [12].

На КА *Эрсмед* совместно использовались скалярный магнитометр с абсолютной погрешностью измерения менее 0,5 нТл, с диапазоном измерений от 16000 до 64000 нТл, и векторный магнитометр с разрешающей способностью менее 0,25 нТл, с диапазоном измерений 65536 нТл [13].

Следует отметить, что съемки МПЗ и решение других задач проводились в течение длительного времени. Так, например КА *Champ*, предназначенный для одновременной съемки параметров магнитного и гравитационного полей Земли с целью установления взаимосвязи между ними, выполнял возложенные на него задачи в течение десяти лет [14].

Определенный интерес с точки зрения проведения съемок МПЗ с использованием КА вызывает программа *Swarm*. Эта программа является очередным проектом Европейского космического агентства, предусматривающим создание серии КА *Earth Explorer*, предназначенных для изучения важнейших параметров Земли и их изменений под воздействием деятельности человека. Одной из задач программы является определение формы МПЗ и ее связи с циркуляцией вод в Мировом океане. Программа предусматривает группировку из трех КА, два из которых летят параллельно в непосредственной близости друг от друга, постепенно снижаясь за 4 года с высоты 460 до 300 км. Третий КА поддерживает высоту около 530 км. Разность наклонов орбит нижней пары КА и верхнего КА в  $0,6^{\circ}$  обеспечивает достижение к третьему году эксплуатации разности наклонов орбитальных плоскостей в  $90^{\circ}$ . Для измерения элементов МПЗ на КА размещаются магнитометры для определения вектора индукции МПЗ и абсолютных значений модуля вектора магнитной индукции [15].

Из анализа программы *Swarm* можно сделать вывод, что использование трех КА может существенно повысить точность съемки МПЗ при одновременном измерении КА элементов МПЗ за счет определения горизонтальных, а в ряде случаев и вертикальных градиентов МПЗ. Такой подход позволяет уменьшить отрицательное влияние возмущений МПЗ на результаты построения высотной модели МПЗ.

Состояние аэромагнитных съемок МПЗ на приземных высотах можно охарактеризовать следующим образом. В связи с изменением МПЗ, вследствие наличия его «векового хода», требуются периодические уточнения его элементов. Ранее это осуществлялось путем проведения магнитных съемок компонент МПЗ по всей территории страны с периодичностью 5 лет, как с самолетов, так и на поверхности Земли с помощью магнитных обсерваторий и сети пунктов «векового хода» в специально выбранных местах. Наблюдения в этих пунктах проводились экспедициями в течение нескольких дней. Последняя съемка была проведена в начале 1970-х годов. На основе этой съемки была создана модульная модель аномального магнитного поля СССР. В 2009 году была опубликована новая международная модель магнитных аномалий модуля МПЗ аномального магнитного поля для всего земного шара, однако для территории России она основывалась на устаревших данных.

В настоящее время значительный прогресс в построении высотных моделей МПЗ состоит в создании СПбФ ИЗМИРАН мировых моделей компонент МПЗ для земного шара на эпоху 2015 года. Эти карты созданы на основе обширной базы магнитометрических данных, полученных в результате многолетних исследований пространственного распределения элементов земного магнетизма и его вековых вариаций на территории бывшего СССР, России и акватории Мирового океана на маломagnitude шхуне «Заря», и расчетных значений компонент МПЗ по модульным измерениям [16].

Проведенный статистический анализ моделей МПЗ показал их достаточно высокие точностные характеристики как для наземных условий, так и для больших высот. Например, расхождение расчетных значений созданных карт магнитного склонения с данными определения склонения в геомагнитных обсерваториях имеет среднеквадратическое отклонение менее 6 угловых минут для 53% ( $N = 117$  случаев измерений) и менее 12 угловых минут для 70% ( $N = 176$ ) измерений в обсерваториях. Проведенный анализ магнитных аномалий модуля вектора индукции МПЗ, полученных на КА *Champ* для высот 100 и 400 км, и расчетных аномалий по модели СПбФ ИЗМИРАН для этих уровней высот показал хорошую сходимость результатов. Так, на высоте 100 км среднеквадратическое отклонение составляет 15,6 нТл, на высоте 400 км – 6,2 нТл.

Таким образом, следует высоко оценить прикладную значимость мировых моделей МПЗ, созданных СПбФ ИЗМИРАН, для геофизического и навигационного обеспечения ЛА. В то же время, учитывая современную обстановку, возникает необходимость в разработке отечественных высокоточных высотных моделей МПЗ. В настоящее время отечественный и зарубежный опыт показывает, что возможны достижение высоких точностей отечественных перспективных магнитометрических съемок и построение высокоточных моделей МПЗ и магнитных карт с ошибкой менее 5 нТл. Исходя из предварительных расчетов, данная ошибка свидетельствует, что возможно определение углового положения ЛА с точностью менее 1 угловой минуты.

Магнитные съемки рекомендуется проводить не менее одного раза в десять лет на разных высотах:

- на высотах полетов КА (250–500 км);
- на высотах полетов самолетов (0,3–8 км);
- на земной поверхности и акваториях.

В промежутках между съемками должны регулярно проводиться измерения абсолютных значений МПЗ и его вариаций в сети обсерваторий и на мобильных пунктах «векового хода» (один раз в 2,5–5 лет). В этом случае будут получены данные для осуществления надежной

навигации и определения ориентации по МПЗ в околоземном космическом пространстве, в атмосфере, на поверхности Земли и акваторий.

При научном прогрессе и разумном использовании технических средств на нашей планете этот вид навигации может существовать в течение сотен тысяч лет, до очередной инверсии МПЗ.

### Список используемых источников

1. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. – 579 с.
2. Михлин Б.З., Селезнев В.П., Селезнев А.В. Геомагнитная навигация. – М.: Машиностроение, 1976. – 280 с.
3. Гурьев И.С. Адаптивные магнитометрические системы контроля пространственного положения. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 96 с.
4. Техническое описание магнитометров КМ-2, КМ-5, КМ-8. – М.: ИЗМИРАН, 1985.
5. Долгинов Ш.Ш., Жузгов Л.Н. Статистические характеристики модульных и компонентных тесламетров // ИЗМИРАН. – М., 1985. – С.37.
6. Пат. на изобретение № 2204151. Устройство для экранирования магнитометров от магнитных полей КА и других объектов / И.С. Гурьев, В.В. Додотченко. – Приоритет от 26.06.2001.
7. Пат. на изобретение № 2204152. Устройство для экранирования магнитометров от магнитных полей КА и других объектов / И.С. Гурьев, В.В. Додотченко. – Приоритет от 26.06.2001.
8. Кузнецов В.Д., Петров В.Г., Копытенко Ю.А. Использование магнитного поля Земли в проблемах ориентации и навигации // Труды 2-й ВНК. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Т. 1. – С. 424–432.
9. ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников / Гос. комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 22 с.
10. Русанова Н.В. Современные феррозондовые магнитометры, разработанные за рубежом // Геофизическая аппаратура. – Л.: Недра, 1975. – Вып. 57. – С. 37–44.
11. International Geomagnetic Reference Field. – URL: [www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html) (дата обращения: 28.01.2016).
12. Американский исследовательский ИСЗ «Magcat». – URL: [//epizodsspace.airbase.ru/bibl/ejeg/1980/80.html](http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/ejeg/1980/80.html) (дата обращения: 28.01.2016).
13. Ørsted Geomagnetic Mission. – URL: [//directory.eoportal.org/web/eoportal/satel-lite-missions/o/oersted.html](http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satel-lite-missions/o/oersted.html) (дата обращения: 28.01.2016).
14. Satellite & Systems. – URL: [//op.gfz-potsdam.de/champ/systems/main\\_SYS-TEMS.html](http://op.gfz-potsdam.de/champ/systems/main_SYS-TEMS.html) (дата обращения: 28.01.2016).
15. Программа Swarm. – URL: [//coopi.khrunichev.ru/main.php?id=6](http://coopi.khrunichev.ru/main.php?id=6) (дата обращения: 28.01.2016).
16. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Опыт применения компонентной модели магнитного поля Земли // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – №4. – С. 30–45.

О.И. Ахметов,  
*кандидат физико-математических наук;*  
М.Н. Мельник;  
И.В. Мингалев,  
*кандидат физико-математических наук;*  
О.В. Мингалев,  
*кандидат физико-математических наук;*  
З.В. Суворова;  
Ю.В. Федоренко,  
*кандидат физико-математических наук*  
Полярный геофизический институт РАН, г. Апатиты

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА

Представлена новая численная модель распространения низкочастотных электромагнитных сигналов в волноводе Земля-ионосфера. Выше земной поверхности решаются уравнения Максвелла вместе с линеаризованной системой уравнений гидродинамики для каждой заряженной компоненты ионосферного газа. Ниже земной поверхности (в литосфере) решаются уравнения Максвелла совместно с законом Ома и материальными уравнениями, в которых скалярные проводимость и проницаемость среды являются заданными функциями координат. На поверхности Земли используются граничные условия на границе раздела сред. Рассматриваются результаты тестовых расчетов.

Ключевые слова: численное моделирование, уравнения Максвелла, низкочастотные электромагнитные сигналы, волновод Земля-ионосфера.

### ВВЕДЕНИЕ

В волноводе Земля-ионосфера постоянно присутствуют низкочастотные электромагнитные сигналы от естественных источников – разрядов молний и от искусственных источников – низкочастотных передатчиков. Такие сигналы, в частности, используются для зондирования литосферы Земли, а также для связи с подводными объектами. В ПГИ создан уникальный комплекс синхронизированного по времени измерения параметров таких сигналов в нескольких удаленных друг от друга точках. Накоплен большой объем данных измерений. Проведенный анализ части этих данных ясно показывает, что характер распространения этих сигналов сильно зависит от состояния нижней ионосферы. Это означает, что данные о распространении этих сигналов содержат важную информацию о состоянии полярной нижней ионосферы, по крайней мере, до высоты 100–120 км над уровнем моря. Для изучения процесса распространения рассматриваемых сигналов и интерпретации имеющихся данных измерений необходима численная модель, которая, во-первых, адекватно описывала бы этот процесс, и, во-вторых, имела бы достаточно малое время одного расчета на доступной вычислительной технике, поскольку для приближенного решения обратной задачи необходимо быстро получить большой набор решений прямой задачи с различными входными параметрами.

За рубежом несколько научных групп создали глобальные численные модели распространения низкочастотных сигналов на основе метода конечных разностей во временной области (метод КРВО, или FDTD method – в зарубежной литературе). В этих моделях для замыкания системы уравнений Максвелла как в литосфере, так и в атмосфере с нижней ионосферой используют закон Ома со скалярной проводимостью

$$\mathbf{j}_{\sigma}(\mathbf{x}, t) = \sigma(\mathbf{x})\mathbf{E}(\mathbf{x}, t), \quad (1)$$



где  $\mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x}, t)$  – плотность порожденного сигналом тока проводимости в среде. При этом пространственное распределение скалярной проводимости  $\sigma(\mathbf{x})$  является входным параметром модели. Такой подход вполне адекватен для литосферы, но недостаточно точен для нижней ионосферы, поскольку не учитываются такие важные факторы, как влияние геомагнитного поля и запаздывание в реакции плазмы на изменение полей.

В данной работе представлены результаты тестовых расчетов и описание основных деталей новой глобальной численной модели распространения низкочастотных электромагнитных сигналов в волноводе Земля-ионосфера, которая разрабатывается в ПГИ и, по сравнению с зарубежными FDTD-моделями, имеет ряд следующих принципиальных новшеств.

1. Для замыкания системы уравнений Максвелла в атмосфере и нижней ионосфере используется линеаризованная система уравнений гидродинамики, состоящая из уравнений непрерывности и уравнений движения Лоренца для вызванных сигналом возмущений концентрации и плотности тока каждой заряженной компоненты ионосферного газа.

2. Для численного решения указанной выше системы уравнений разработана новая явная схема с «противопотоковой» аппроксимацией волнового оператора, которая имеет 2-й порядок точности по времени и пространству. Схема позволяет моделировать точечные и сингулярные источники стороннего тока, а также решения со сколь угодно большими пространственными градиентами и разрывные решения, что недоступно FDTD-моделям. В основе этой схемы лежит разработанная новая явная устойчивая схема для линейного волнового уравнения, которая численно воспроизводит распространение фронта в соответствии с аналитическим решением. Схема показала хорошие вычислительные свойства. При этом она удобна для параллельных вычислений на графических процессорах.

3. Создана эффективная программная реализация модели с выполнением основного объема вычислений на графических процессорах TITAN. Благодаря этому модель имеет более высокое пространственное разрешение и приемлемое время расчета обхода сигнала от разряда молнии вокруг Земли на мощном персональном компьютере с одним или двумя графическими процессорами TITAN.

Модель состоит из двух независимых блоков: атмосферно-ионосферного и литосферного, которые связаны граничными условиями на поверхности Земли. Ограниченный по пространству вариант литосферного блока может использоваться отдельно для моделирования распространения сигналов в литосфере.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В МОДЕЛИ

Область моделирования является сферическим слоем  $\Pi = \Pi_A \cup \Sigma_E \cup \Pi_L$ , который поверхность Земли  $\Sigma_E$  делит на две части:

- 1) верхнюю часть  $\Pi_A$  от поверхности Земли  $\Sigma_E$  до заданной высоты  $H_A \geq 100$  км над уровнем океана, которая включает атмосферу и нижнюю ионосферу;
- 2) нижнюю часть  $\Pi_L$ , которая соответствует верхней литосфере.

В атмосфере и нижней ионосфере (при  $\mathbf{x} \in \Pi_A$ ) рассматривается система уравнений Максвелла в системе СИ с единичными относительными проницаемостями ( $\varepsilon = 1$ ,  $\mu = 1$ )

$$\operatorname{div} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\operatorname{rot} \mathbf{E}(\mathbf{x}, t), \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\varepsilon_0} \left( \rho_\sigma(\mathbf{x}, t) + \rho^{(s)}(\mathbf{x}, t) \right), \quad (3)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{B}(\mathbf{x},t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \left( \mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x},t) + \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x},t) \right), \quad (4)$$

вместе с линеаризованной системой уравнений гидродинамики для вызванных сигналом малых возмущений концентрации  $n_\alpha(\mathbf{x},t)$  и плотности тока  $\mathbf{j}_{\sigma\alpha}(\mathbf{x},t)$  заряженных частиц каждого сорта  $\alpha$  ионосферного газа, которые имеют вид:

$$\rho_\sigma(\mathbf{x},t) = \sum_\alpha q_\alpha n_\alpha(\mathbf{x},t), \quad q_\alpha \frac{\partial n_\alpha(\mathbf{x},t)}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j}_{\sigma\alpha}(\mathbf{x},t) = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x},t) = \sum_\alpha \mathbf{j}_{\sigma\alpha}(\mathbf{x},t), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{j}_{\sigma\alpha}(\mathbf{x},t)}{\partial t} + v_{\alpha 0}(\mathbf{x}) \mathbf{j}_{\sigma\alpha}(\mathbf{x},t) + \frac{q_\alpha}{m_\alpha} \left[ \mathbf{B}_0(\mathbf{x}) \times \mathbf{j}_{\sigma\alpha}(\mathbf{x},t) \right] = \frac{q_\alpha^2}{m_\alpha} n_{\alpha 0}(\mathbf{x}) \mathbf{E}(\mathbf{x},t). \quad (7)$$

В формуле (7) использованы следующие обозначения:  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные,  $c_0 = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$  – скорость света в вакууме,  $q_\alpha$  и  $m_\alpha$  – заряд и масса заряженных частиц сорта  $\alpha$ . Неизвестными функциями в системе (2)–(7) являются  $\mathbf{E}(\mathbf{x},t)$  и  $\mathbf{B}(\mathbf{x},t)$  – поля сигнала, а также вызванные сигналом малые возмущения концентрации  $n_\alpha(\mathbf{x},t)$  и плотности тока  $\mathbf{j}_{\sigma\alpha}(\mathbf{x},t)$  заряженных частиц сорта  $\alpha$ . Входными параметрами модели являются плотность стороннего тока в источнике  $\mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x},t)$ , а также геомагнитное поле  $\mathbf{B}_0(\mathbf{x})$  и равновесные концентрация  $n_{\alpha 0}(\mathbf{x})$  и частота столкновений  $v_{\alpha 0}(\mathbf{x})$  частиц каждого сорта  $\alpha$  ионосферного газа, которые рассматриваются как заданные стационарные функции пространственных координат  $\mathbf{x}$ , поскольку за время обхода сигнала вокруг Земли порядка 0,125 секунды они практически не изменяются. Через  $\rho^{(s)}(\mathbf{x},t)$  обозначена плотность заряда в источнике, которая должна быть выражена через заданную плотность стороннего тока в источнике  $\mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x},t)$ .

В литосфере (при  $\mathbf{x} \in \Pi_L$ ) уравнения (2) сохраняются, а уравнения (3) и (4) примут вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{D}(\mathbf{x},t) = \rho_\sigma(\mathbf{x},t) + \rho^{(s)}(\mathbf{x},t), \quad (8)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H}(\mathbf{x},t) - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x},t) + \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x},t). \quad (9)$$

При этом нужно учитывать материальные уравнения

$$\mathbf{D}(\mathbf{x},t) = \varepsilon_0 \varepsilon(\mathbf{x}) \mathbf{E}(\mathbf{x},t); \quad \mathbf{B}(\mathbf{x},t) = \mu_0 \mu(\mathbf{x}) \mathbf{H}(\mathbf{x},t) \quad (10)$$

вместе с законом Ома в форме (1). Пространственные распределения в области  $\Pi_L$  относительных проницаемостей  $\varepsilon(\mathbf{x})$ ,  $\mu(\mathbf{x})$  и проводимости  $\sigma(\mathbf{x})$  также являются входными параметрами модели. На поверхности Земли  $\Sigma_E$  используются стандартные условия для полей на границе раздела сред. На верхней и нижней границах сферического слоя  $\Pi$  используется условие свободного ухода волны, выполнение которого обеспечивается введением модельного поглощающего слоя, прилегающего к границе  $\partial \Pi$  с внешней стороны.

Для численного решения смешанной (начально-краевой) задачи осуществляется переход к потенциалам:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \text{rot}\mathbf{A}(\mathbf{x}, t); \quad \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = -\nabla\varphi(\mathbf{x}, t) - \frac{\partial\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)}{\partial t}. \quad (11)$$

Для системы уравнений (2)–(7) в области  $\Pi_A$  удобно использовать калибровку Лоренца, которая в атмосфере и нижней ионосфере (при  $\mathbf{x} \in \Pi_A$ ) имеет вид

$$\frac{\partial\varphi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + c_0^2 \text{div}\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (12)$$

и определяет скалярный потенциал  $\varphi(\mathbf{x}, t)$  через векторный по формуле

$$\varphi(\mathbf{x}, t) = \varphi(\mathbf{x}, t^0) - c_0^2 \int_{t^0}^t \text{div}\mathbf{A}(\mathbf{x}, \theta) d\theta. \quad (13)$$

В результате система уравнений (2)–(7) для атмосферы и нижней ионосферы сводится к системе уравнений, которая включает линейное волновое уравнение для векторного потенциала

$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} - c^2 \Delta \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\varepsilon_0} (\mathbf{j}_\sigma(\mathbf{x}, t) + \mathbf{j}^{(s)}(\mathbf{x}, t)), \quad (14)$$

уравнение (6), а также уравнения движения Лоренца (7), в которые надо подставить второе уравнение в (11) и формулу (13). По сравнению с исходной системой (2)–(7) количество неизвестных функций и уравнений в полученной системе (14), (6), (7), (11), (13) уменьшено. Для этой системы уравнений упомянутая во введении новая схема численного решения показала высокую эффективность. Аналогичная по подходу методика применяется для преобразования и численного решения системы уравнений (2), (8)–(10), (1) в области  $\Pi_L$  для литосферы, где используется калибровка:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \omega_\sigma(\mathbf{x})\varphi + c^2(\mathbf{x}) \text{div}\mathbf{A} = 0,$$

$$\text{где } \omega_\sigma(\mathbf{x}) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon},$$

$$c^2(\mathbf{x}) = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно опубликованным работам по глобальным FDTD-моделям, а также нашим тестовым расчетам, для воспроизведения ключевых особенностей распространения низкочастотных сигналов достаточно иметь верхнюю границу в модели на высоте 100 км над уровнем моря. В этом случае в качестве заряженных частиц можно учитывать только электроны.

Имеются различные методики построения пространственных распределений в нижней ионосфере электронной концентрации и температуры, концентрации нейтральных атомов, геомагнитного поля и расчета частоты столкновений электронов. Подставляя входные параметры для выбранных гелеогеофизических условий в численную модель, можно рассчитать картину распространения низкочастотных электромагнитных сигналов в волноводе Земля-ионосфера.

Сравнение полученной в расчетах картины с данными измерений позволит уточнить методики построения (для заданных геологофизических условий) пространственных распределений параметров в нижней ионосфере и более детально изучить их влияние на процессы распространения низкочастотных электромагнитных сигналов.

С.З. Беккер;  
С.И. Козлов;  
А.Н. Ляхов  
Институт динамики геосфер РАН, г. Москва

## О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Предложены новые методы уточнения статистических моделей ионосферы. Сужены диапазоны гелиогеофизических условий для лучшего согласия с экспериментом. Проведен анализ чувствительности решений уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла к входным параметрам, в результате которого выявлены наиболее значимые параметры. Обнаружено качественное согласие радиофизических параметров СДВ-ДВ волны на среднширотной трассе с экспериментальными данными ГФО Михнево. На основании полученных результатов предложены новые пути усовершенствования двух направлений статистического моделирования.

Ключевые слова: ионосфера, статистическое моделирование, теория вероятности, анализ чувствительности, распространение СДВ-ДВ волны.

### ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является развитие методов, изложенных в [4, 5], по разработке статистических моделей D-области ионосферы, необходимых для расчета распространения радиоволн СДВ-ДВ. Как показано в работе [1], на данный момент на выбранной в качестве примера трассе DCF 77, Германия – Михнево ( $f = 77,5$  кГц, 2009 год) наблюдается лишь качественное согласие радиофизических (амплитудных) характеристик с экспериментальными данными, полученными в геофизической обсерватории (ГФО) Михнево.

Основные принципы построения статистических моделей, необходимых для описания нерегулярных, непрерывно изменяющихся сред, таких, как ионосфера Земли, были сформулированы в [4], но впервые детально развиты и опробованы для расчета распространения СДВ-ДВ в работе [5].

Все описанные модели предложено разбить на эмпирически-статистические, создаваемые на основании статистического анализа экспериментальных геофизических данных, и детерминированно-вероятностные, в основу которых положены теоретические исследования, а варьируются только неизвестные параметры, входящие в уравнения. Для достижения необходимых результатов, имеющих прежде всего прикладной характер, статистические модели обязательно должны совмещаться с радиофизическими моделями.

### ЭМПИРИЧЕСКИ-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Первая попытка создать эмпирически-статистическую модель D-области ионосферы была предпринята в 2014 году на основании данных [2]. В результате было получено качественное согласие кривых плотности вероятности распределения амплитуды сигнала на трассе длиной 2023 км на частоте 77,5 кГц, полученных в эксперименте и в расчете (рис. 1). Средние значения экспериментальной и рассчитанной амплитуды в разных гелиогеофизических условиях практически совпадали, уверенно находясь в пределах среднеквадратического отклонения, но вероятности получения той или иной величины сильно отличались.

В первую очередь естественно было бы предположить, что причиной такого несогласия является усреднение большого объема геофизических данных из-за выбранного разбиения гелиогеофизических условий. В рамках данной работы с целью получить лучшее согласие с экспериментом был проведен сравнительный анализ кривых плотности вероятности радиофизических параметров в более узких диапазонах гелиогеофизических условий. Были рас-

смотрены средние значения не за все летние месяцы, а только за июнь, а дневные часы были сужены до временного интервала с 12 до 13 ч местного времени. Как можно видеть на рис.2, лучшего согласия получить не удалось, что говорит об острой нехватке экспериментальных данных в рассматриваемых гелиогеофизических условиях. Появление более или менее полных эмпирических банков данных электронной концентрации существенно улучшит блок расчета  $N_e(h)$ , что несомненно приблизит полученные кривые плотности вероятности распределения амплитуды к кривым, полученным по экспериментальным данным ГФО Михнево.

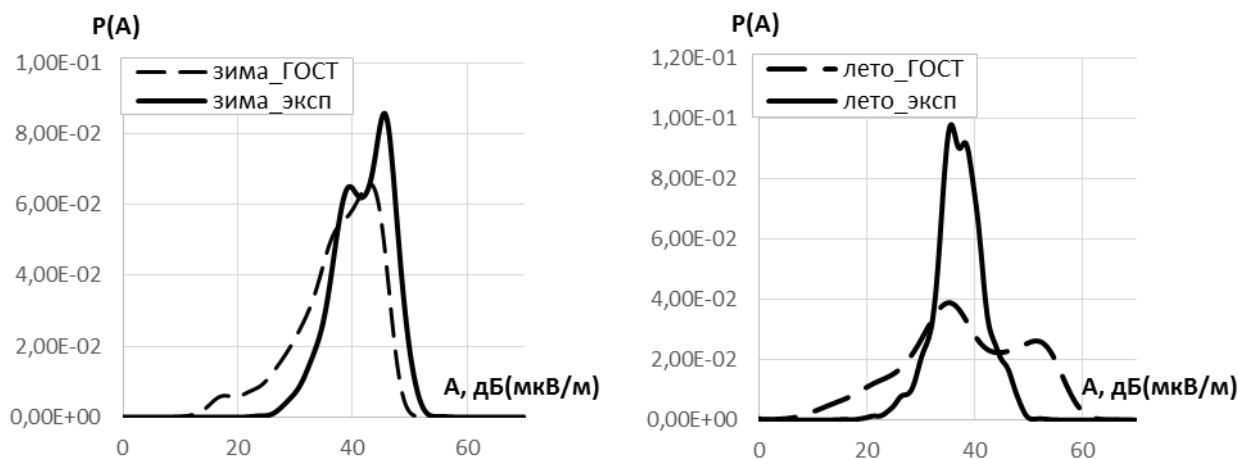


Рис.1. Плотности вероятности распределения амплитуды радиоволны для частоты 77,5 кГц, рассчитанные по эмпирически-статистической модели и полученные в эксперименте [низкая солнечная активность; день; зимой (а) и летом (б)]

## ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ

Будем считать, что поведение электронной концентрации описывается 4-ионной схемой, использованной в [3]:  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2^-$ , сложными кластерными положительными  $\text{Cv}^+$  и отрицательными  $\text{Cv}^-$  ионами.

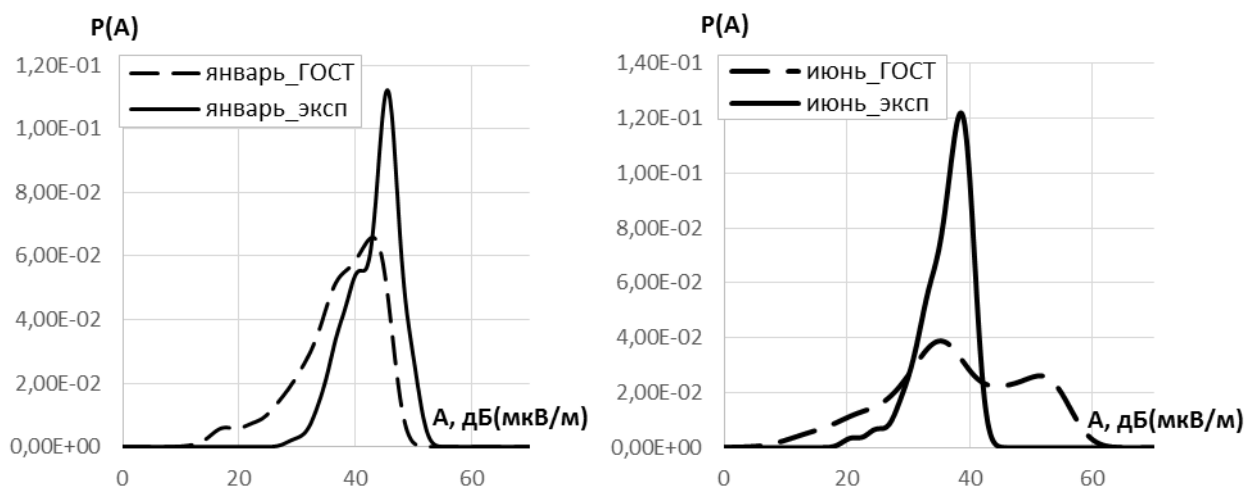


Рис. 2. Плотности вероятности распределения амплитуды радиоволны для частоты 77,5 кГц, рассчитанные по эмпирически-статистической модели и полученные в эксперименте [низкая солнечная активность; 12-13 LT; в январе (а) и июне (б)]

Не очень сложный анализ системы уравнений с учетом современных представлений о D-области, многолетних измерений температуры и концентраций малых нейтральных состав-

ляющих атмосферы на высотах ниже 100 км на американских ИСЗ UARS и EOS-Aura [6] показал, что наиболее изменчивыми (или просто неизвестными) параметрами являются:  $\alpha_i$  – константа скорости ион-ионной рекомбинации,  $\alpha_d$  – коэффициент диссоциативной рекомбинации,  $q$  – скорость ионизации,  $[\text{CO}_2]$ ,  $[\text{H}_2\text{O}]$ ,  $[\text{O}_3]$  и  $T$ .

В работе [5] в результате анализа многочисленной литературы были приняты пределы вариации этих параметров и законы их распределения (табл.1).

Таблица 1

**Средние значения, пределы изменения и законы распределения  
варьируемых параметров**

Параметр	Среднее значение	Пределы изменения	Закон распределения
$\alpha_i$	$10^{-7}$	$10^{-8}-10^{-6}$	Равномерный
$\alpha_d$	$2.55 \cdot 10^{-5}$	$10^{-6}-5 \cdot 10^{-5}$	Равномерный
$[\text{CO}_2]$	$10^{-4}([\text{O}_2]+[\text{N}_2])$	$(10^{-5}-10^{-3})([\text{O}_2]+[\text{N}_2])$	Нормальный
$[\text{H}_2\text{O}]$	$10^{-6}([\text{O}_2]+[\text{N}_2])$	$(10^{-7}-10^{-5})([\text{O}_2]+[\text{N}_2])$	Нормальный
$[\text{O}_3]$	$[\text{O}_3]$	$(0.2-3) [\text{O}_3]$	Равномерный
$q$	$q_{cp}$	$(0.1-10) q_{cp}$	Нормальный

Поскольку решения задач распространения радиоволн напрямую зависят от профилей электронной концентрации, полученных из уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла, точность задания варьируемых параметров и их законов распределения очень важна. Проанализировав чувствительность решений уравнений фотохимии D-области ионосферы, в частности электронной концентрации, можно сузить задачу определения неизвестных параметров до поиска лишь наиболее весомых при варьировании коэффициентов.

Для оценки влияния того или иного входного данного на решение необходимо провести анализ системы дифференциальных уравнений на чувствительность, т.е. выяснить, как сильно будут меняться значения переменных в зависимости от введенных параметров.

Чувствительностью решения  $y$  к параметру  $p$  называется частная производная  $\frac{dy}{dp}$ . При рассмотрении чувствительности решения  $y$  к параметру  $p_i$  все остальные параметры  $p_j$ ,  $i \neq j$ , фиксируются. Расчет системы из 10 дифференциальных уравнений, пять из которых для концентраций  $[\text{NO}^+]$ ,  $[\text{XY}^+]$ ,  $[\text{O}_2^-]$ ,  $[\text{XY}^-]$ ,  $[\text{Ne}]$  и пять для чувствительностей этих величин к каждому из параметров, проводился на высотах D-области. В качестве примера будут приведены результаты на высоте 50 км. Для того чтобы оценить, на какое решение системы параметр оказывает наибольшее влияние, необходимо рассмотреть не абсолютные, а относительные значения чувствительностей (табл.2).

Таблица 2

**Относительные чувствительности на 50 км**

	$[\text{NO}^+]$	$[\text{XY}^+]$	$[\text{O}_2^-]$	$[\text{XY}^-]$	Ne
$q$	3,3	1,5	3,3	1,5	3,3
$T$	0,06	$5,77 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$4,04 \cdot 10^{-6}$	-0,006
$[\text{O}_3]$	$-2,08 \cdot 10^{-14}$	~0	$-1,82 \cdot 10^{-11}$	~0	$-1,64 \cdot 10^{-13}$
$[\text{H}_2\text{O}]$	$-6,81 \cdot 10^{-12}$	$3,47 \cdot 10^{-16}$	~0	~0	~0
$[\text{CO}_2]$	$-6,93 \cdot 10^{-14}$	~0	~0	~0	~0

Исходя из анализа табл. 2, можно сделать вывод, что на рассматриваемых высотах электронная концентрация наиболее чувствительна к варьированию скорости ионизации  $q$ , являющейся явной функцией концентраций нейтралов. Таким образом, сейчас для улучшения результатов уже построенной авторами [5] детерминированно-вероятностной модели D-области ионосферы необходимо в первую очередь уточнить законы распределения концен-

траций нейтралов и эффективной частоты соударений  $\nu_{eff}(h)$  электронов с нейтральными и ионизированными компонентами, играющей большую роль в распространении радиоволн. После чего необходимо сгенерировать электронные профили с помощью датчика случайных чисел и рассчитать радиофизические параметры на указанной трассе с повторным сопоставлением с экспериментальными данными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработка моделей ионосферы для последующего решения прикладных задач по распространению радиоволн в широком диапазоне частот является сложной проблемой из-за многообразия гелиогеофизических факторов, влияющих на поведение среды.

2. Статистическое моделирование ионосферы является, по сути, новым направлением. Помимо ярко выраженного прикладного, оно имеет и фундаментальное значение, связанное с отказом от детерминированного описания открытой физической системы.

3. Получение вероятностных полей ионосферных параметров не является самоцелью, а необходимо лишь для решения прямых радиофизических задач. Модель считается построенной, если позволяет прогнозировать вариации плотности вероятности распределения заданных радиофизических параметров при изменении внешних условий, и эти плотности вероятности согласуются с экспериментом.

4. Попытка разбить статистические экспериментальные геофизические данные согласно более узким диапазонам гелиогеофизических условий не приводит к лучшему согласию с экспериментом, и потому основной трудностью для разработки статистических моделей первого типа является отсутствие в достаточном объеме экспериментальных данных.

5. Вероятность неучета важного физического механизма и бесполезные затраты машинного времени – основные причины усовершенствования второго типа статистических моделей. Анализ чувствительности, проведенный в данной работе, помог выявить наиболее важный параметр уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла при расчете  $N_e(h)$ .

## Список используемых источников

1. Беккер С.З. Статистическая модель D-области ионосферы. Сопоставление радиофизических расчетов по распространению СДВ-ДВ с экспериментальными данными // Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» г. Санкт-Петербург. – 2014. – Т.1. – С. 407–413.

2. ГОСТ Р-25645.15-94. Ионосфера Земли нижняя. Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей. / Госстандарт России. – М., 1994.

3. Влияние метеорологических и волновых процессов на нижнюю ионосферу в условиях минимума солнечной активности по экспериментальным данным о распространении СДВ-ДВ в средних широтах / А.А. Егошин, В.М. Ермак, И.Ю. Зецер и др. // Физика Земли. – 2012. – № 3. – С. 101–112.

4. Козлов С.И., Бикинцев Б.Ф., Новикович В.М. Статистическая модель основных параметров невозмущенной ионосферы для расчета распространения КВ на протяженных трассах // Тезисы докладов 4-го межвед. семинара по моделированию ионосферы. – Томск, 1978. – С.38–40.

5. Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 6. – С. 767–779.

6. Water J.W. et al. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 2006. – Vol.44, №5. – P.1075–1092.



М.А. Бисярин,

*доктор физико-математических наук*

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

## **НЕЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В НЕОДНОРОДНОМ ВОЛНОВОДНОМ КАНАЛЕ**

Рассмотрен нелинейный процесс распространения акустического импульса в цилиндрическом волноводном канале. Система гидродинамических уравнений сведена к нелинейному волновому уравнению с квадратичной зависимостью скорости от амплитуды волны, и получено выражение для коэффициента нелинейности через характеристики среды. Представлено аналитическое описание модовой структуры импульса и нелинейной динамики огибающей с учетом продольной неоднородности волноводного канала.

Ключевые слова: атмосферный акустический волновод, система уравнений Эйлера, нелинейное волновое уравнение, огибающая импульса, показатель адиабаты, нелинейное уравнение Шредингера, светлый солитон, темный солитон, градиентный волновод

### **ВВЕДЕНИЕ**

Решение практических задач мониторинга природных сред требует развития нелинейных моделей распространения и взаимодействия электромагнитных, акустических, гравитационных и других типов волн. При этом среда распространения является существенно неоднородной, слоистой и в ней могут формироваться волноводные каналы, как постоянные, так и спорадические. Отмечалось появление особых инфразвуковых каналов в зоне полярных сияний [1]. Исследовались перемещающиеся ионосферные возмущения, и моделировалась электронная концентрация в них [2]. Волноводные каналы могут создаваться искусственно: так, в процессе ионосферного распространения мощный электромагнитный пучок модифицирует плазму и создает волноводный канал, повторяющий форму пучка [3].

Актуальной проблемой является разработка общих аналитических методов описания нелинейных режимов волноводного распространения волн различной природы. Данная работа посвящена изучению амплитудно-модулированного акустического импульса в волноводном канале с продольной неоднородностью.

### **РЕДУКЦИЯ СИСТЕМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ К НЕЛИНЕЙНОМУ ВОЛНОВОМУ УРАВНЕНИЮ**

Гидродинамические и акустические процессы сопровождаются рядом специфических эффектов, которые могут быть объяснены и описаны только в рамках полной системы уравнений Эйлера (или Навье – Стокса, если учитываются также и диссипативные процессы) [4]. Тем не менее в акустических волнах проявляются также и общие черты волновой динамики, что позволяет применять к ним методы и результаты общей теории линейных и нелинейных волн [5]. Исследования распространения нелинейного акустического импульса, исходя непосредственно из полных гидродинамических систем уравнений [6], обеспечивают полное описание процесса, однако особенности, характерные для нелинейных волн независимо от их физической природы, оказываются скрытыми в громоздких преобразованиях. Прямое же применение нелинейного уравнения Шредингера к описанию динамики огибающей импульса [7] оставляет вне исследования свойства несущей и поперечную структуру поля импульса.

Многие явления нелинейной акустики имеют прямые аналоги электромагнитной природы [8] (например, в нелинейной оптике), хорошо описываемые нелинейным волновым уравнением с квадратичной зависимостью показателя преломления от распространяющегося волнового поля. Поэтому представляется естественным обобщить процедуру вывода волнового уравнения из линеаризованной системы уравнений Эйлера для нелинейного случая, причем

так, чтобы можно было аналитически описать поперечное распределение волнового поля и нелинейную эволюцию огибающей импульса в условиях совместного действия большой мощности, малой длительности и неоднородности волноводного канала.

Учет нелинейных акустических эффектов достигается путем сохранения нелинейных членов в уравнениях непрерывности, движения и состояния системы Эйлера. Представим плотность и давление в виде сумм  $\rho_o + p$  и  $p_o + p$  соответственно, где  $\rho_o$  и  $p_o$  – постоянные плотность и давление в равновесном состоянии, а  $p$  и  $p$  – зависящие от координат и времени отклонения от этих равновесных значений. Пусть движение происходит только по оси  $x$ , тогда уравнения непрерывности и движения приобретают вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} v + \rho_o \frac{\partial v}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad ; \quad \rho_o \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_o v \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad . \quad (1)$$

Считая распространение звука адиабатическим процессом, уравнение состояния, связывающее давление и плотность среды, запишем с точностью до кубических слагаемых:

$$\rho = \frac{1}{c_o^2} p + \frac{\alpha_2}{2} p^2 + \frac{\alpha_3}{6} p^3 + \dots \quad . \quad (2)$$

В формуле (2)  $\alpha_2 = \left( \frac{\partial^2 p}{\partial p^2} \right) \Big|_{s, p_o}$ ,  $\alpha_3 = \left( \frac{\partial^3 p}{\partial p^3} \right) \Big|_{s, p_o}$ , а  $c_o = \sqrt{\frac{\gamma p_o}{\rho_o}}$  – адиабатическая скорость звука,  $\gamma$  – пока-

затель адиабаты. После подстановки выражения (2) в уравнения (1), дифференцирования первого из них по  $t$  и второго по  $x$  и вычитания из первого второго получается уравнение, содержащее только неизвестную функцию  $p$ . Самовоздействие волны характеризуется кубическими слагаемыми, а нелинейность процесса проявляется в квадратичной зависимости скорости волны от ее амплитуды:

$$\Delta p - \frac{1 + \lambda |p|^2}{c_o^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad , \quad \text{здесь} \quad \lambda = \frac{\alpha_3 c_o^2}{2} - \frac{\alpha_2}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o^2 c_o^4} \quad . \quad (3)$$

Уравнение (3) обобщает волновое уравнение линейной акустики на нелинейный режим, а характеризующий нелинейность коэффициент  $\lambda$  определяется уравнением состояния (2).

При положительных значениях коэффициента  $\lambda$  среда является фокусирующей, при отрицательных – дефокусирующей. Для адиабатического распространения звука в идеальном газе этот коэффициент может быть выражен в явном виде через показатель адиабаты  $\lambda = \frac{(2\gamma - 3)(\gamma + 1)}{2\rho_o^2 \gamma^2}$ , из чего следует, что  $\gamma = 3/2$  разделяет фокусирующие и дефокусирующие

среды. Этот вывод находится в соответствии с математическими исследованиями [9] системы уравнений Навье – Стокса, доказавшими различный качественный характер решений в зависимости от величины показателя адиабаты  $\gamma$ .

## НЕЛИНЕЙНЫЙ ИМПУЛЬС В НЕОДНОРОДНОМ ВОЛНОВОДНОМ КАНАЛЕ

Представление (2) справедливо при малых величинах отклонения давления от равновесного значения, поэтому будем считать, что функция  $p/p_o$  принимает значения порядка  $\epsilon \ll 1$ . По аналогии с электромагнитными процессами введем в качестве характеристики среды квадрат показателя преломления  $w = \frac{c_o^2}{c^2}$ , где  $c$  – действительная скорость звука в среде, за-

висящая как от вариаций давления в распространяющейся волне, так и от точки среды. Плоский волноводный канал (двумерная задача) был рассмотрен в [10]. В данной работе волноводный канал в среде в окрестности некоторой осевой линии формируется вследствие определенного типа зависимости  $w$  от поперечной радиальной координаты  $r$ , будем считать его осесимметричным, не зависящим от поперечной азимутальной координаты  $\phi$ . Допустима зависимость свойств канала от  $z$  – продольной координаты вдоль его оси, однако по самому

смыслу волноводного канала эта зависимость должна быть существенно слабее зависимости от  $r$ . Введем переменную  $\sigma = \varepsilon^2 z$  и зададим  $w$  в виде

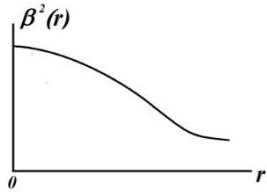


Рис. 1. Общий вид функции  $\beta^2(r)$

$$w = \beta^2(r, \sigma) + \frac{1}{2} \alpha(r, \sigma) |p|^2 + \varepsilon^2 \Gamma(\sigma). \quad (4)$$

Функцией  $\beta^2(r, \sigma)$  определяются наличие волноводного канала и его свойства в линейном режиме. Общий вид ее при произвольном  $\sigma$  показан на рис. 1: она должна иметь максимум на оси канала и плавно спасть с ростом  $r$ . Мнимое слагаемое введено в формуле (4) формально для учета поглощения в среде.

Применим нелинейное волновое уравнение  $\Delta p - w \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$  к анализу распространения короткого импульса в волноводном канале со слабой продольной неоднородностью, для чего построим решение, асимптотическое по малому параметру  $\varepsilon$ . Поскольку оно должно представлять собой волну, распространяющуюся вдоль оси, введем фазовую переменную  $\vartheta = \frac{Q(\sigma)}{\varepsilon} - \varepsilon t$  с неизвестной вещественной функцией  $Q(\sigma)$ . Решение нелинейного волнового уравнения будем искать в виде

$$p = \varepsilon P(r, \vartheta, \sigma, \phi, \varepsilon) \exp \left[ i \left( \frac{S(\sigma)}{\varepsilon^2} - t \right) \right] + \text{к.с.}, \quad (5)$$

комплексная амплитуда  $P$  разлагается в ряд по степеням  $\varepsilon$ :  $P(r, \vartheta, \sigma, \phi, \varepsilon) = \sum_j \varepsilon^j P_j(r, \vartheta, \sigma, \phi)$ , причем все члены ряда стремятся к нулю при удалении от оси. Принципиальной особенностью выражения (5) является различие фаз высокочастотного заполнения  $S(\sigma)/\varepsilon^2 - t$  и комплексной амплитуды  $\vartheta$ .

Выражение (5) подставляем в нелинейное волновое уравнение, в результате образуется серия задач при последовательных степенях  $\varepsilon$ . В главном порядке комплексная амплитуда удовлетворяет задаче Штурма – Лиувилля

$$\frac{\partial^2 P_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_0}{\partial r} + (\beta^2(r, \sigma) - s^2(\sigma)) P_0 + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P_0}{\partial \phi^2} = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} P_0 = 0, \quad P_0 \text{ ограничена при } r = 0. \quad (6)$$

В последнем выражении использованы обозначения:  $s^2(\sigma)$  – собственное число,  $P_0$  – соответствующая собственная функция. Задачей (6) определяется полный набор мод, которые могут распространяться в волноводном канале, заданном посредством функции  $\beta^2(r, \sigma)$ . Любая собственная функция представима в виде произведения  $P_0(r, \vartheta, \sigma, \phi) = V(r, \sigma) F(\vartheta, \sigma) e^{im\phi}$ , в котором  $m$  – целое число. Вещественная функция  $V(r, \sigma)$ , нормированная условием  $\int_0^\infty r V^2(r, \sigma) dr = 1$ , представляет собой поперечное распределение поля, медленно меняющееся в процессе распространения. Комплексная функция  $F(\vartheta, \sigma)$  удовлетворяет уравнению

$$2is(\sigma) \frac{\partial F}{\partial \sigma} + g(\sigma) \frac{\partial^2 F}{\partial \vartheta^2} + j(\sigma) F + h(\sigma) |F|^2 F = 0 \quad (7)$$

и описывает нелинейную динамику огибающей импульса. Коэффициенты уравнения (7) явно выражаются через характеристики моды (6), т.е. эволюция огибающих различных мод имеет различные количественные характеристики. Им соответствуют явные аналитические выражения в случае квадратичной зависимости  $\beta^2(r, \sigma)$  от радиальной координаты.

Для некоторых особых типов продольной неоднородности решения (7) представляют собой светлые или темные солитоны. Как показано в работе [7], типичными для воздуха ( $\gamma =$

=1,41) являются темные солитоны огибающей. Если коэффициенты уравнения (7) связаны соотношением  $2g(\sigma)r(\sigma) = -\mu^2 h(\sigma)$  с произвольным  $\mu = \text{const}$ , то решение представляется в виде темного солитона

$$F(\vartheta, \sigma) = \frac{\mu}{\sqrt{s(\sigma)}} \text{th} \left( \vartheta - \int_0^{\sigma} \frac{g(\tilde{\sigma})}{s(\tilde{\sigma})} d\tilde{\sigma} \right) \exp i \left( \vartheta + \int_0^{\sigma} \frac{s'(\tilde{\sigma}) - 3g(\tilde{\sigma})}{2s(\tilde{\sigma})} d\tilde{\sigma} \right) \exp \left( - \int_0^{\sigma} \frac{\Gamma(\tilde{\sigma})}{2s(\tilde{\sigma})} d\tilde{\sigma} \right)$$

с амплитудой, формой, шириной и скоростью, медленно меняющимися в процессе распространения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Слабонелинейные акустические волновые процессы представляют собой отдельный класс волнового движения, существенно отличающийся от процессов, в которых нелинейность выступает как доминирующий фактор. Включение слабой нелинейности в теоретическую модель позволяет описать возникновение нелинейных эффектов на фоне линейного приближения. В отличие от сильной слабая нелинейность не влияет на несущую импульса в градиентном волноводном канале со слабой продольной неоднородностью, но формирует солитонную огибающую. Предложенная в данной работе методика позволяет аналитически описать моды акустического сигнала и нелинейную эволюцию огибающей в волноводном канале с продольной неоднородностью.

## Список используемых источников

1. Wilson C.R. Auroral infrasonic waves // Journal of Geophysical Research. – 1969. – Vol.74, №7.
2. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. Наклонное зондирование и моделирование ионосферного коротковолнового канала // Известия вузов. Радиофизика. – 2005. – Т.48, №6.
3. Черкашин Ю.Н., Ерёмченко В.А. Искусственное поддержание нелинейных волноводов в нестационарной плазме // XXIII Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн: сборник докладов. – Йошкар-Ола, 2011. – Т.1. – С.129–134.
4. Бахвалов Н.С., Жилейкин Я.М., Заболотская Е.А. Нелинейная теория звуковых пучков. – М.: Наука, 1982.
5. Молотков И.А. Аналитические методы в теории нелинейных волн. – М.: Наука, 2003.
6. Заболотская Е.А., Шварцбург А.Б. Нелинейный акустический волновод // Акустический журнал. – 1987. – Т.33, №2.
7. Nozaki K., Taniuti T. Envelope solitons in nonlinear acoustics // Physica D. – 1986. – Vol.23, №1–3.
8. Бункин Ф.В., Кравцов Ю.А., Ляхов Г.А. Акустические аналоги нелинейных оптических явлений // УФН. – 1986. – Т.149, №3.
9. Плотников П.И., Соколовский Я. Стационарные краевые задачи для уравнений Навье – Стокса с показателем адиабаты  $\gamma < \frac{3}{2}$  // ДАН. – 2004. – Т.397, №2.
10. Бисярин М.А. Акустические импульсы конечной амплитуды в волноводном слое с продольной неоднородностью // ПМТФ. – 2007. – Т.48, №6.

В.И. Бубукин;

И.Т. Бубукин,

доктор физико-математических наук

ФГБУ «Научно-исследовательский радиофизический институт», г. Нижний Новгород

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОПУЗЫРЬКОВОГО СЛОЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК ИНДИКАТОР ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ГРАНИЦЕ МОРЕ – АТМОСФЕРА

В результате экспериментальных и теоретических исследований морской поверхности в инфракрасном (ИК) диапазоне сделан вывод о том, что имеющиеся данные натурального эксперимента согласуются с моделью тонкого (по сравнению со скин-слоем ИК-диапазона) микропузырькового слоя с величиной доли воздуха в микропузырьковом слое 0,5:0,6 и толщиной слоя 1:3 мкм. Показано, что толщина микропузырькового слоя в рамках этой модели является индикатором величины теплового потока на границе море – атмосфера.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, водная поверхность, инфракрасный диапазон, теплообмен, микропузырьковый слой, поток тепла.

### ВВЕДЕНИЕ

Пленочный слой морской поверхности непосредственно граничит с атмосферой, через него идут интенсивные процессы газообмена между атмосферой и морем, и в нем – максимальная концентрация растворенных атмосферных газов. Разработанные в НИРФИ методы и приборы для исследования физических процессов в пленочном слое взволнованной морской поверхности в ИК-диапазоне позволили исследовать его структуру и обнаружить существенное отличие диэлектрических свойств верхней части пленочного слоя, граничащего с атмосферой, от данных лабораторных измерений [1]. Обнаруженный эффект объясняется наличием под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности слоя (толщиной в десятки микрон), заполненного смесью воды и воздуха, – *микропузырькового слоя*. Основная его характеристика  $\rho$  – объемная доля воздуха в микропузырьковом слое, по данным натуральных измерений она существенно изменчива и зависит от внешних условий [2]. Данные натуральных измерений ранее интерпретировались в однослойной модели оптически толстого однородного слоя с толщиной, по крайней мере, 1,5-2 толщины скин-слоя, состоящего из статистической смеси воды и микропузырьков воздуха, формирующегося под пленкой поверхностного натяжения. Полученные в эксперименте значения отражательной способности позволяли, в рамках однородного слоя, определить концентрацию воздуха в микропузырьковом слое, а обнаруженная в эксперименте существенная изменчивость отражательной способности морской поверхности в ИК-диапазоне связывали с изменением концентрации воздуха в микропузырьковом слое. Однако всплывающие пузырьки воздуха должны концентрироваться под пленкой поверхностного натяжения, что учитывается двухслойной моделью: оптически тонкий микропузырьковый слой с максимальной концентрацией воздуха – вода.

Самая простая задача о распространении волн в неоднородной среде – это задача о падении плоской монохроматической волны на плоскую границу двух сред с различными свойствами. При этом возникают преломленная (прошедшая) и отраженная волны. Пусть граница раздела между двумя полубесконечными однородными средами совпадает с плоскостью  $Z = 0$ . Среда, расположенные сверху ( $Z > 0$ ) и снизу ( $Z < 0$ ) от границы, характеризуются соответственно параметрами  $\epsilon_1, \mu_1$  и  $\epsilon_2, \mu_2$ . Здесь  $\epsilon_{1,2} = \epsilon'_{1,2} - i\epsilon''_{1,2}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость среды, индексы 1 и 2 относятся к верхней и нижней средам. Так как морская вода является немагнитной средой, магнитные проницаемости будем считать  $\mu_1 = \mu_2 = 1$ . На эту границу из первой среды падает плоская волна под углом  $\theta_1$  к оси  $Z$ . При этом образу-

ются отраженная волна под углом  $\theta_0$  и волна, прошедшая внутрь второй среды под углом  $\theta_2$ . В этом случае коэффициенты отражения  $r^{B,\Gamma}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \theta_1, \theta_2)$  по полю описываются формулами Френеля [3]:

$$r^B = \frac{E_0}{E_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_2}; \quad r^\Gamma = \frac{E_2}{E_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_2}{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cdot \cos \theta_2}, \quad (1)$$

где индексы в, г означают вид поляризации: вертикальную (в) – когда вектор электрического поля лежит в плоскости падения, и горизонтальную (г) – когда вектор электрического поля перпендикулярен ей, индексы 1 и 2 относятся к средам,  $\theta_{0,1,2}$  – углы от вертикальной оси  $\mathbf{Z}$ . Углы падения  $\theta_1$  и отражения  $\theta_0$ , а также преломления  $\theta_2$  связаны соотношениями (закон отражения и закон Снеллиуса):

$$\theta_0 = \theta_1, \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}}. \quad (2)$$

Если поглощение сред равно нулю и  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – действительные, то углы  $\theta_0, \theta_1, \theta_2$  – действительные углы между нормалью к фронту преломленной волны и вертикальной осью  $\mathbf{Z}$ . Но соотношения (1) и (2) справедливы и в случае сред с поглощением (комплексная диэлектрическая проницаемость сред) [3].

В случае падения плоской монохроматической волны на двухслойную среду, состоящую из полубесконечной поглощающей среды, покрытой полупрозрачным слоем с отличающейся диэлектрической проницаемостью, задача существенно усложняется из-за переотражения волн на границах раздела.

Решение данной задачи для сред без потерь приведено в [4]. По аналогичной методике с учетом того, что соотношения (1) и (2) справедливы и для комплексных параметров, было получено соотношение для коэффициента отражения двухслойной среды  $r_{123}^{B,\Gamma}$  с поглощением

$$r_{123}^{B,\Gamma} = \frac{r_{12}^{B,\Gamma} + r_{23}^{B,\Gamma} \cdot \exp\left(-i2 \frac{\omega}{c} l \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}\right)}{1 + r_{12}^{B,\Gamma} \cdot r_{23}^{B,\Gamma} \cdot \exp\left(-i2 \frac{\omega}{c} l \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}\right)}. \quad (3)$$

В этом соотношении используются обозначения:  $r_{12}^{B,\Gamma}$  и  $r_{23}^{B,\Gamma}$  – коэффициенты отражения на границах сред 1-2 и 2-3,  $\omega$  – круговая частота,  $c$  – скорость света,  $l$  – толщина слоя,  $i$  – мнимая единица.

Соотношения для  $r_{12}^{B,\Gamma}$  и  $r_{23}^{B,\Gamma}$  были получены из выражений (1) и (2), для случая  $\varepsilon_1 = 1$  (первая среда – воздух). При выводе комплексные углы  $\theta_2, \theta_3$  выражались через угол падения  $\theta_1$ . Тогда

$$r_{12}^B = \frac{\varepsilon_2 \cdot \cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}}{\varepsilon_2 \cdot \cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}}, \quad r_{12}^\Gamma = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1}}, \quad (4)$$

$$r_{23}^B = \frac{\varepsilon_3 \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} - \varepsilon_2 \cdot \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}}{\varepsilon_3 \cdot \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} + \varepsilon_2 \cdot \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}}, \quad r_{23}^\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} - \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}}{\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_1} + \sqrt{\varepsilon_3 - \sin^2 \theta_1}}.$$

В соответствии с методом Левина – Рытова [5] спектральная интенсивность в данном направлении пропорциональна той мощности, которую поглощает среда при падении на нее плоской электромагнитной волны, идущей с этого направления. Таким образом, задача по определению теплового излучения двухслойной среды сводится к более простой задаче об отражении плоской волны. В результате получим коэффициент излучения двухслойной сре-

ды  $J_{123}^{B,\Gamma}$  через плотность потока энергии, рассеянный в верхнее полупространство, т.е. через коэффициент отражения по мощности  $R_{123}^{B,\Gamma}$ :

$$\begin{aligned} R^{B,\Gamma} &= |r^{B,\Gamma}|^2 & J^{B,\Gamma} &= 1 - R^{B,\Gamma}(\varepsilon_2, \theta_1), \\ R_{123}^{B,\Gamma} &= |r_{123}^{B,\Gamma}|^2 & J_{123}^{B,\Gamma} &= 1 - R_{123}^{B,\Gamma}(\varepsilon_2, \varepsilon_3, \theta_1). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналитические соотношения (3), (4) и (5) являются радиофизической моделью излучения двухслойной поглощающей среды, т.е. решением поставленной задачи.

Исследования излучений морской поверхности проводились в Отузском заливе Черного моря. Аппаратура была установлена на конце пирса Карадагского природного заповедника, имеющего свайное основание. Измерения проводились летом (июль, август), в ночное время. Расстояние от берега  $\sim 100$  м, глубина в месте измерений  $\sim 2$  м. Диапазон длин волн принимаемого инфракрасного излучения составлял 8–14 мкм. Одновременно с ИК-измерениями измерялись температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра на высоте 5 м над морской поверхностью и температура воды на глубине 1 м.

По данным натурального эксперимента [2] измеренная величина объемной концентрации микропузырьков воздуха в скин-слое ИК-излучения (однослойная модель) максимальна и составляет  $\rho_{\max} = 0,57$  при наибольшей по абсолютной величине разности температур воды в поверхностной температурной пленке и на глубине 1 м и падает при ее уменьшении.

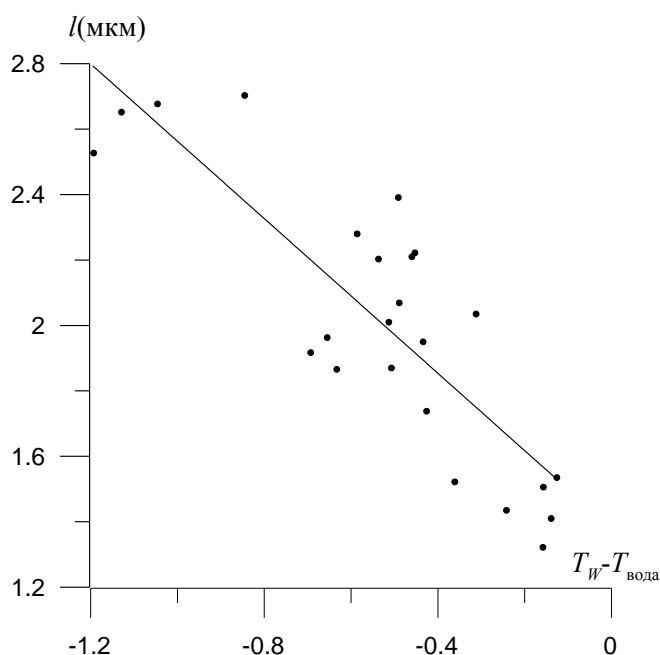


Рис.1. Зависимость толщины микропузырькового слоя  $l$  в рамках двухслойной модели от разности температур воды в поверхностной температурной пленке  $T_w$  и на глубине 1 м

В рамках двухслойной модели с помощью алгоритма решения обратной задачи по определению характеристик микропузырькового слоя на основе соотношений (3), (4) и (5) была проведена обработка данных натуральных наблюдений при максимальной концентрации воздуха  $\rho_{\max} = 0,57$ . На рис. 1 точками показана полученная зависимость толщины микропузырькового слоя  $l$  в микрометрах в рамках двухслойной модели от разности температур воды в поверхностной температурной пленке  $T_w$  и на глубине 1 м, изменявшейся в пределах  $-1,2 < (T_w - T_{\text{вода}}) \leq 0$ , а сплошной линией – регрессионная зависимость

$$l = -1,182 \cdot (T_w - T_{\text{вода}}) + 1,384 \quad (6)$$

с коэффициентом корреляции  $K = -0,83$ .

Так как  $(T_w - T_{\text{воды}})$  пропорциональна градиенту температуры в пограничном слое, то из анализа рис. 1 следует, что толщина микропузырькового слоя может быть индикатором величины теплового потока на границе море – атмосфера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных натурных измерений собственных излучений атмосферы и морской поверхности в ИК-диапазоне и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Радиофизическая модель собственного излучения двухслойной поглощающей среды, состоящей из среды с сильным поглощением, покрытой полупрозрачным поглощающим слоем с отличающейся диэлектрической проницаемостью, применима для собственного ИК-излучения слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности, состоящего из смеси воды и микропузырьков воздуха и находящейся под ним водной среды.

2. В случае двухслойной модели наблюдаемая изменчивость связана с изменениями толщины слоя. По данным натурных измерений определены параметры двухслойной модели: концентрация воздуха  $\rho = 0,5 \div 0,6$  и толщина  $l = 1 \div 3$  мкм.

3. Толщина микропузырькового слоя может быть индикатором величины теплового потока на границе море – атмосфера.

## Список используемых источников

1. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Дистанционная диагностика пленочного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т.57, №10. – С.1089–1098.
2. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Газообмен между морем и атмосферой и механизм образования микропузырькового слоя под пленкой поверхностного натяжения морской поверхности по натурным измерениям собственных излучений этих сред в инфракрасном диапазоне // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т.61, №3. – [В печати].
3. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука, 1979. – 383 с.
4. Измерение радиотепловых и плазменных излучений / А.Е. Башаринов, Л.Т. Тучков, В.М. Поляков, Н.И. Ананов. – М.: Советское радио, 1968. – 390 с.
5. Левин М.Л., Рытов С.М. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике. – М.: Наука, 1967. – 308 с.



А.В. Быков;

А.Н. Шихов

*кандидат географических наук*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

## **ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ В ПЕРМСКОМ КРАЕ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ WRF И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Проанализированы результаты моделирования формирования и эволюции мезомасштабных конвективных систем (МКС) с опасными явлениями погоды над территорией Западного Урала с помощью численной модели атмосферы WRF/ARW. Показано, что характеристики интенсивности МКС воспроизводятся моделью с достаточной достоверностью. Однако качество прогноза пространственного положения МКС в большинстве случаев неудовлетворительное, что может определяться начальными условиями.

Ключевые слова: мезомасштабные конвективные системы, краткосрочный прогноз, модель WRF, данные дистанционного зондирования

### **ВВЕДЕНИЕ**

Ежегодно по данным спутниковых наблюдений над территорией Западного Урала фиксируется несколько случаев прохождения мезомасштабных облачных систем глубокой конвекции, сопровождающихся сильными ливнями, градом и шквалистым усилением ветра. Под мезомасштабными конвективными системами (МКС) понимают ансамбль грозовых штормов, производящий непрерывную зону осадков масштаба не менее 100 км [1]. Понятие МКС включает широкий спектр форм и масштабов систем глубокой конвекции от линий шквалов, скоплений локальных штормов, мезомасштабных конвективных комплексов до систем осадков атмосферных фронтов [3]. Анализ и прогноз формирования и эволюции МКС, их положения в пространстве, а также интенсивности связанных с ними опасных явлений (ОЯ) представляют большой интерес для практики. Поскольку большинство случаев ОЯ связано с МКС масштаба мезо- $\alpha$ , то особенно актуально изучение именно таких систем – мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) и линий шквалов (ЛШ). Для решения этой задачи в настоящее время существуют несколько негидростатических моделей атмосферы, способных непосредственно воспроизводить глубокую конвекцию без использования процедур параметризации. Из свободно доступных моделей наиболее популярными являются модели WRF-ARW и WRF-NMM.

Для территории Урала ранее изучалась возможность прогнозирования с помощью модели WRF лишь отдельных случаев выпадения крупного града, развития сильных шквалов и смерчей [2, 4]. Однако задача объективной оценки качества прогноза опасных конвективных явлений по модели WRF в этих работах решена не была.

### **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для расчетов использована модель WRF/ARW версии 3.6.1 – численная негидростатическая региональная система прогнозирования погоды. Инициализация модели WRF и задание граничных условий (с шагом 1 ч) выполнены по данным реанализа численной модели прогноза CFS. Таким образом, численные эксперименты проводились в режиме «квазипрогноза».

Расчет выполнялся на 38 вертикальных уровнях, период моделирования составлял 24 ч, а временной шаг вывода данных – 1 ч. Размер области расчета составлял 400 на 400 точек с пространственным разрешением, равным 4 км. Модель WRF запускалась со следующими схемами параметризации подсеточных процессов: микрофизика облачности – схема Томпсона, длинноволновая радиация – схема RRTM, коротковолновая радиация – схема Дудья, при-

земный слой – схема Монины – Обухова с вязким подслоем Карлсона – Боланда и стандартными функциями подобия, подстилающая поверхность и почва – схема NOAH; пограничный слой – схема университета Енсей. Параметризация конвекции не применялась, производилось ее прямое моделирование.

Визуализация выходных данных выполнялась в программных пакетах OpenGrADS 2.0 и ArcGis. Использовались следующие выходные данные модели: интенсивность осадков в виде дождя и града (крупы), мм/ч; расчетное максимальное значение радиоэха конвективных облаков, DBz; скорость ветра на высоте 10 м; высота верхней границы облаков ( $H_{\text{вго}}$ , км) и температура на данном уровне (температура верхней границы облаков (ВГО), °C).

Оценка качества результатов моделирования производилась путем их сопоставления со спутниковыми данными Terra/Aqua MODIS, полученными из архивов NASA (Goddard Space Flight Center). Использовались измерения радиояркостной температуры верхней границы облаков в 31 канале прибора MODIS (с пространственным разрешением 1000 м). Дополнительно выполнялось сопоставление выходных данных модели с данными метеорологического радиолокатора МРЛ-5, установленного в аэропорту Бол. Савино.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Общая оценка качества прогнозов производилась по трем градациям. В ряде случаев объект (МКС) вообще не воспроизводился моделью, или же местоположение его центра тяжести отличалось от фактического (определенного по спутниковым данным) более чем на 150 км. Такие прогнозы оценивались как неоправдавшиеся (оценка «0»). Если МКС воспроизводилась моделью, но ее характеристики ( $H_{\text{вго}}$ , площадь, пространственное положение) существенно отличались от фактических (данных ДЗЗ и МРЛ), то прогноз считался частично оправдавшимся (оценка «0,5»). Прогноз оценивался как оправдавшийся (оценка «1») в случае, если модель воспроизводила МКС с незначительными ошибками по ее положению в пространстве и параметрам интенсивности.

Таблица 1

### Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем по модели WRF

Дата	Тип МКС	Максимальная $H_{\text{вго}}$ , км (данные МРЛ/ модель)	Температура ВГО, °C (данные MODIS/ модель)	Наблюдавшиеся опасные явления	Оценка качества прогноза
20.07.2004	МКК	13/14	<-60/<-60	Шквал 27 м/с, град	1
20.08.2008	МКК	15/-	<-60/-	Крупный град 20–70 мм	0
06.06.2009	МКК	13/12	<-60/<-60	Крупный град 33 мм	1
19.06.2009	ЛШ	13/13	<-60/<-60	Шквал 24–28 м/с, град	0,5
03.08.2010	МКК	13/13	-60/-60	Шквал 18–21 м/с, град	0,5
05.06.2011	ЛШ	12/12	-55/-55	Ливневые дожди, шквал до 17 м/с, град	1
06.07.2011	МКК	-*/11	<-60/-55	Сильный ливень (до 39 мм/12ч)	0,5
04.06.2012	МКК	-*/-	<-60/-	Сильный ливень (39–42 мм/12ч)	0
09.06.2012	МКК	13/13	<-60/<-60	Крупный град 30 мм, шквал 19–22 м/с, сильный ливень (до 49 мм)	0

Окончание табл. 1

Дата	Тип МКС	Максимальная $H_{\text{ВГО}}$ , км (данные МРЛ/ модель)	Температура ВГО, °С (данные MODIS/ модель)	Наблюдавшиеся опасные явления	Оценка качества прогноза
21.06.2012	МКК	13/-	<-60/-	Сильный ливень (23–34 мм/12ч)	0
22.06.2012	МКК	12/12	-60/-55	Сильный ливень (58 мм/12 ч)	1
04.07.2012	МКК	13/12	-60/-55	Сильный ливень (40–55 мм/12 ч)	0,5
18.07.2012	МКК	13/13	<-60/-60	Шквал 20–28 м/с, сильный ливень (до 36 мм), град (до 22 мм)	0,5
18.07.2012	ЛШ	13/ -	-55/ -	Шквал 20–28 м/с	0
24.06.2013	МКК	-*/-	<-60/ -	Крупный град 18–30 мм	0
11.07.2013	МКК	-*/-	-55/ -	Сильные ливни (30–35 мм/12 ч)	0
06.07.2014	МКК	13/12	-55/-55	Сильные ливни (26–44 мм/12 ч)	0,5
29.08.2014	МКК	14/-	<-60/ -	Смерч, град до 50 мм, шквал 22 м/с, сильный дождь (до 30 мм)	0
20.06.2015	МКК	-*/-	<-60/ -	Сильные ливни (22–45 мм/12 ч)	0
24.06.2015	МКК	14/13	<-60/-60	Сильные ливни (до 117 мм/12 ч), шквал, град	1
29.06.2015	ЛШ	14/ -	<-60/ -	Шквал до 29 м/с, сильные ливни (до 40 мм/12 ч)	0

\* Данные МРЛ отсутствуют.

Как видно из анализа табл. 1, в половине рассмотренных случаев прогнозы модели WRF оцениваются как неоправдавшиеся. Из них в четырех случаях модель не воспроизводит появление МКС над изучаемой территорией, а в шести случаях имеет место значительное смещение МКС относительно фактического положения в пространстве. Ошибки в прогнозе положения МКС, как правило, обусловлены влиянием начальных условий (например, смещением фронтальной зоны относительно ее положения по данным глобальной модели).

В свою очередь, такие параметры, как температура ВГО и  $H_{\text{ВГО}}$ , а также мгновенная интенсивность осадков (определяемая по значениям радиоэха) воспроизводятся моделью достаточно хорошо. Несмотря на высокий процент неоправдавшихся прогнозов, в ряде случаев модель WRF может быть полезным инструментом для оперативного предупреждения о конвективных ОЯ.

В качестве примера приведены результаты моделирования случая возникновения МКС над Пермским краем 18 июля 2012 года.

В целом траектория прохождения МКК и интенсивность осадков (до 30 мм/ч) воспроизводятся моделью удовлетворительно, а скорость ветра при шквалах несколько занижена. В то же время модель не воспроизводит формирование во второй половине дня над восточной частью Пермского края еще одной МКС – линии шквалов. Это связано со смещением траектории основного МКК на восток в сравнении с фактическим его положением (рис. 1). Таким

образом, в данном случае по модели WRF мог быть дан сверхкраткосрочный прогноз времени прохождения МКК с развитием опасных явлений с точностью  $\pm 1$  ч. Однако пространственное положение зон наиболее интенсивных ливней и шквалов не совпадает с фактическим.

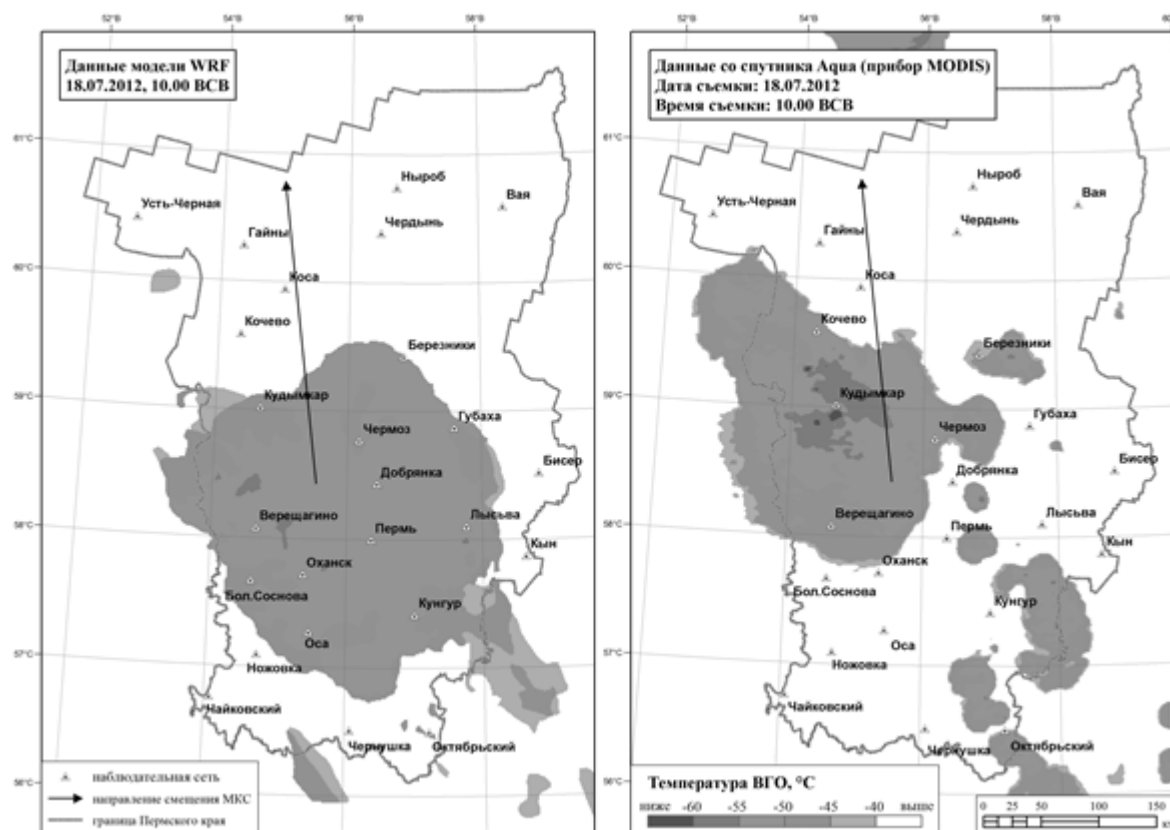


Рис. 1. МКК над Западным Уралом 18.07.2012 по данным модели WRF (слева) и по снимку Aqua MODIS (справа)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов численных экспериментов по моделированию возникновения и эволюции мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF позволяет сформулировать следующие выводы.

В половине случаев качество прогноза формирования и эволюции МКС и связанных с ними конвективных опасных явлений оценивается как неудовлетворительное, т.е. модель либо вообще не воспроизводит появление МКС, либо пространственное положение МКС по прогнозу сильно отличается от фактического. В большинстве случаев неправильно прогнозируется положение конвективных систем в пространстве, что зависит от начальных условий (данных реанализа CFS). Положение зон сходимости по данным глобальных моделей часто определяется с ошибкой в 50–100 км и более, что приводит к ошибкам при прогнозе места и времени возникновения МКС по мезомасштабной модели. Таким образом, качество прогноза может повышаться по мере совершенствования глобальных моделей.

В ряде случаев модель WRF успешно воспроизводит формирование МКС с сильными шквалами, крупным градом и сильными ливнями, поэтому применение ее для сверхкраткосрочного прогноза конвективных опасных явлений представляет определенный интерес, несмотря на большой процент неоправдавшихся прогнозов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-05-96000-р-Урала) и Фонда содействия инновациям (проект № 4323ГУ1/2014).

### Список используемых источников

1. *Абдуллаев С.М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: автореферат дис. д-ра геогр. наук: 25.00.30. – М., 2010. – 50 с.
2. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF / Н.А. Калинин, А.Л. Ветров, Е.М. Связов, Е.В. Попова // *Метеорология и гидрология*. – 2013. – № 9. – С. 21–30.
3. *Ленская О.Ю.* Мезомасштабная организация и эволюция систем осадков на юге Бразилии: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.30. – М., 2006. – 220 с.
4. *Шихов А.Н., Быков А.В.* Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2015. – Т. 12, №3. – С. 124–133.

И.А. Готюр,  
доктор техн. наук;  
М.Ю. Рудь

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, ПОСТУПАЮЩЕЙ С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

В статье рассматривается математическая модель автоматизированной системы обработки метеорологической спутниковой информации. В разработанной модели основные требования предъявляются к выходным характеристикам системы. Соответственно предложенная модель позволяет построить систему обработки спутниковой информации, формирующей тематические продукты требуемого качества.

Ключевые слова: метеорологическая спутниковая информация (метеорологические спутники), автоматизированная обработка, математическая модель.

### ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития Вооруженных сил Российской Федерации характеризуется усложнением военно-технических систем. При этом увеличивается степень зависимости эффективности их применения от гидрометеорологических, метеорологических и геофизических условий (ГМУ). Последнее обстоятельство диктует необходимость более детального и корректного учета ГМУ при планировании операций и оперативном управлении военно-техническими системами, что, в свою очередь, требует совершенствования системы их гидрометеорологического обеспечения (ГМО). В соответствии с предназначением, для обеспечения конкретных военно-технических систем специфической информацией применяется специализированное ГМО.

Немаловажную роль при ГМО играет информация, получаемая с метеорологических искусственных спутников Земли (МИСЗ). Развитие спутниковых технологий и разработка новых методов обработки данных способствуют ежегодному увеличению количества задач, которые могут быть решены с использованием спутниковой информации.

Необходимость решения задачи создания и применения специализированных автоматизированных систем обработки спутниковой гидрометеорологической информации требуемого качества обуславливает потребность в разработке моделей и методов синтеза автоматизированных систем обработки информации, поступающей с МИСЗ.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Целью обработки данных дистанционного зондирования Земли является их интерпретация в рамках конкретной задачи с получением тематических информационных продуктов.

Информация со спутника передается в бинарном виде и содержит последовательности пакетов заданных форматов вида

$$I = \langle Fr_1, Fr_2, \dots, Fr_n \rangle, \quad (1)$$

где  $Fr_i = \langle t, V_{(s)}, C_{(s)}, Q_{(s)} \rangle$ . В формуле (1) использованы следующие обозначения:  $t$  – метка времени;  $s$  – количество датчиков спутника;  $V_{(s)}$  – измерения датчиков, установленных на спутнике, характеризующихся спектральным, радиометрическим и пространственным разрешением;  $C_{(s)}$  – калибровочные измерения;  $Q_{(s)}$  – телеметрическая информация.

Выходной информацией является вектор следующего вида:

$$\tilde{I} = \langle V_T, Q_T, L, T \rangle, \quad (2)$$

- где  $V_T$  – тематическая информация, представленная в требуемом виде;  
 $Q_T$  – вектор флагов состояния (ошибочное значение, скорректированное и т.п.);  
 $L$  – данные географической привязки;  
 $T$  – вектор меток времени.

Процесс обработки можно разделить на несколько основных этапов:

- усвоение данных;
- предварительную обработку;
- тематическую обработку.

Учитывая, что все этапы обработки выполняются последовательно внутри одного процесса, их входные и выходные данные должны быть согласованы.

Этап усвоения включает в себя решение следующих задач:

- идентификации данных – определения спутника, с которого получены данные, их формата, времени начала и окончания сеанса;
- восстановления пропущенных из-за слабого сигнала и помех пакетов;
- анализа данных.

Для усвоения входных данных используется набор правил, сопоставляющих бинарные данные со структурой пакетов:

$$U = \langle u_1, u_2, \dots, u_m \rangle, \quad (3)$$

где  $u_j$  – правило, задающее однозначное соответствие между входным бинарным потоком и структурой пакета  $j$ -го формата.

В общем виде процесс усвоения можно представить следующим образом:

$$\tilde{I}_{A(s)} = f_A(u_j(I), A_A), \quad (4)$$

- где  $f_A$  – алгоритм усвоения данных в соответствии с правилом  $u_j$ ;  
 $A_A$  – наземная информация о спутнике и приборах, установленных на нем;  
 $\tilde{I}_{A(s)}$  – выходной вектор, содержащий данные  $S$  приборов спутника.

Данные одного прибора имеют следующий вид:

$$\tilde{I}_A = \langle V_{(n)}, C, T \rangle, \quad (5)$$

где  $V_{(n)}$  – данные всех каналов прибора;

$n$  – количество каналов;

$C$  – калибровочная информация;

$T$  – вектор меток времени.

Предварительная обработка может включать в себя следующие задачи:

- радиометрическую коррекцию – исправление аппаратных радиометрических искажений, обусловленных характеристиками используемого съемочного аппарата;
- фильтрацию – устранение искажений, появившихся вследствие зашумления при передаче по каналам связи и из-за несовершенства датчиков;
- радиометрическую калибровку – преобразование значений выходного сигнала измерительного прибора в значения физических величин;
- атмосферную коррекцию – устранение влияния атмосферы на измеренный датчиками сигнал;
- геометрическую коррекцию – устранение геометрических искажений снимка, вызванных кривизной поверхности Земли;
- географическую привязку данных.

В зависимости от вида исходной метеорологической информации и требований к выходным данным, часть этапов может быть пропущена.

Процесс предварительной обработки для  $S$  приборов имеет следующий вид:

$$\tilde{I}_{P\langle s \rangle} = f_P(I_{A\langle s \rangle}, A_P), \quad (6)$$

где  $f_P$  – алгоритм предварительной обработки;

$A_P$  – дополнительная информация, требуемая алгоритмом.

Структура выходных данных предварительной обработки одного прибора  $\tilde{I}_P$  имеет следующий вид:

$$\tilde{I}_P = \langle V_p, Q_p, L, T \rangle, \quad (7)$$

где  $V_p$  – значения физических величин;

$Q_p$  – флаг состояния значений  $V_p$ ;

$L$  – данные привязки;

$T$  – вектор меток времени.

Тематическая обработка выполняется с целью интерпретации спутниковой информации в рамках конкретной задачи с получением тематических информационных продуктов (маска облачности, температура подстилающей поверхности и др.).

Процесс тематической обработки состоит из нескольких этапов (рис. 1):

- преобразования откалиброванных измерений в тематический продукт;
- представления полученного результата в заданном виде (в виде таблицы, диаграммы, изображения, монтаж изображений, видеоматериалы).

Общая схема обработки метеорологической информации соответственно будет иметь вид, представленный на рис. 1.

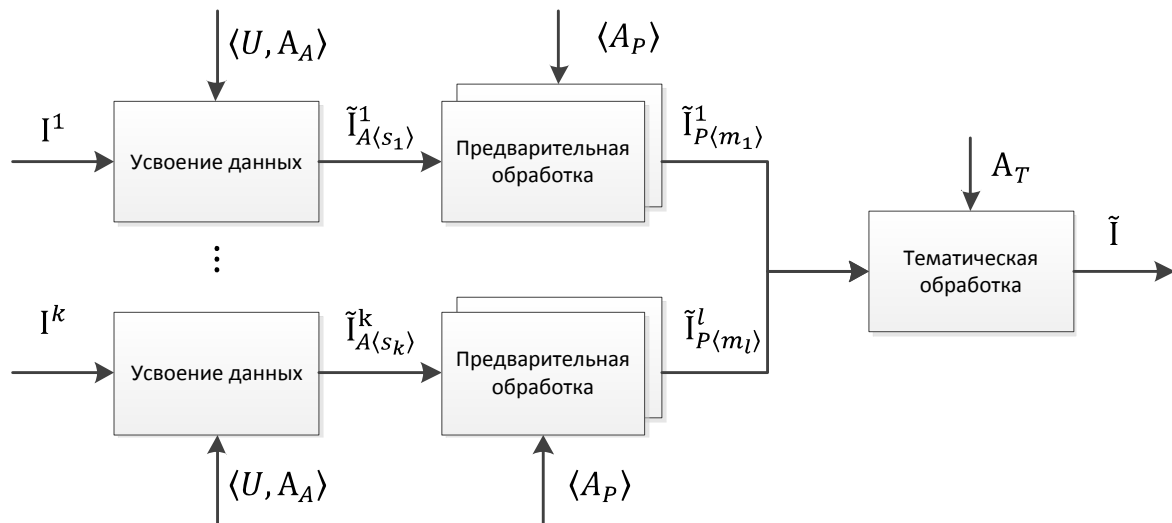


Рис. 1. Схема обработки спутниковой метеорологической информации

Получение тематического продукта  $\tilde{I}_T$  можно представить в следующем виде:

$$\tilde{I}_T = f_T(\tilde{I}_{P\langle m \rangle}, A_T), \quad (8)$$

где  $f_T$  – алгоритм тематической обработки;

$\tilde{I}_{P\langle m \rangle}$  – результаты предварительной обработки  $m$  приборов, требуемые для выполнения ТО;

$A_T$  – дополнительные данные (результаты других тематических обработок, климатические данные, фактические метеоданные, таблицы классификаций).

Для представления данных в требуемом виде может потребоваться несколько тематических продуктов:



$$\tilde{I} = f_V(\tilde{I}_{T(l)}), \quad (9)$$

где  $f_V$  – правило преобразования тематических продуктов к требуемому виду;

$l$  – количество необходимых тематических продуктов.

Обобщая вышесказанное, процесс обработки спутниковой информации можно представить в следующем виде:

$$\tilde{I} = f(I_{\langle k \rangle}) = f_V \left( \bigcup_{i=1}^l f_T \left( A_T, f_P \left( A_P, f_A(U, A_A, I^k) \right) \right) \right), \quad (10)$$

где  $k$  – количество необходимых входных потоков данных со спутников.

## МЕТОД СИНТЕЗА

Учитывая, что рассматриваемая подсистема ГМО прежде всего предназначена для преобразования информации, требования к характеристикам  $\tilde{I}_O$  выходных данных являются основными.

Как было показано в [1], синтез подсистемы ГМО будет заключаться в определении таких значений ее параметров, чтобы

$$\begin{cases} \rho_T(\tilde{I}_O, \tilde{I}) \rightarrow 0 \\ \rho_P(\tilde{I}_{P_O}, \tilde{I}_P) \rightarrow 0, \\ \rho_A(\tilde{I}_{A_O}, \tilde{I}_A) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (11)$$

где  $\rho$  – метрика, определяющая «близость» значений  $\tilde{I}_O$  и  $\tilde{I}$ ;

$\tilde{I}_{P_O}$  – требования к выходным характеристикам подсистемы предварительной обработки со стороны подсистемы тематической обработки;

$\tilde{I}_{A_O}$  – требования к подсистеме усвоения со стороны подсистемы предварительной обработки.

Пусть  $M$  – оператор, идеальным образом связывающий входные данные  $I$  с результатом обработки  $\tilde{I}$ . Тогда задача оптимального синтеза системы спутникового ГМО формулируется следующим образом:

$$I^O = \arg \min \rho(f(I_{\langle k \rangle}), M), \quad (12)$$

где  $I^O$  – искомые значения параметров модели.

Необходимо отметить наличие ограничений функционирования системы, влияние которых может привести, в том числе, и к невозможности выполнения целевой задачи. Можно выделить несколько источников таких ограничений:

- характеристики обеспечивающей системы, такие как орбита спутника, пространственное, радиометрическое и спектральное разрешение установленных приборов;
- параметры внешней среды, такие как сезон, время суток, метеорологические явления;
- отсутствие необходимых дополнительных данных для выполнения алгоритмов обработки.

Решая задачу (12) с учетом перечисленных ограничений, получим систему обработки информации, поступающей с метеорологических искусственных спутников Земли с требуемыми характеристиками.

## ВЫВОД

Разработанная математическая модель позволяет построить оптимальную специализированную систему ГМО, предоставляющую тематические информационные продукты, расчи-

танные с использованием спутниковой информации, в соответствии с требованиями обеспечиваемой военно-технической системы.

### Список используемых источников

1. Состояние и принципы построения автоматизированных систем сбора, обработки и представления комплексной гидрометеорологической информации для обеспечения авиации, надводных кораблей, судов и береговых объектов ВМФ / А.Е. Дроздов, И.А. Готюр, Ю.В. Кулешов, С.С. Суворов, Г.Г. Щукин // *Навигация и гидрография*. – 2013. – № 36. – С. 87–96.
2. *Жуковский Е.Е.* Метеорологическая информация и экономические решения. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 303 с.
3. *Чандра А.М., Гош С.К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
4. *Чернышов В.Н., Чернышов А.В.* Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.
5. *Menzel P.W.* 2006. Remote Sensing Applications With Meteorological Satellites // NOAA Satellite and Information Service / University of Wisconsin, Madison WI. – P. 307.

И.В. Дворецкая\*,

кандидат географических наук, доцент;

В.М. Захаров\*\*,

доктор физико-математических наук, профессор;

Г.М. Крученицкий \*\*,

доктор физико-математических наук, доцент;

Р.Г. Романов\*\*\*

\* Украинский гидрометеорологический институт.

\*\* Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета.

\*\*\* СУМГФ ФАКИ МФТИ.

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИББСА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АТМОСФЕРНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМ ЧИСЛОМ ЧАСТИЦ

*Теория, обладающая математической красотой, имеет больше шансов оказаться правильной чем уродливая теория, согласующаяся с какими-то числами.*

П.А.М. Дирак

Рассмотрена возможность использования распределения Гиббса для моделирования вертикальных профилей атмосферных компонентов в квазитермостатированных системах на примерах концентрации озона в стратосфере и электронов в ионосфере. Показано, что гипотезы о квазитермостатированности указанных систем и самоэкранировании химического потенциала в них приводят к дифференциальным уравнениям для зависимости концентрации от высоты, решения которых хорошо согласуются с данными прямых измерений. Полученные результаты позволяют регуляризовать некорректную обратную задачу восстановления профилей атмосферных компонентов по результатам зондирования в оптическом и коротковолновом диапазонах.

Ключевые слова: распределение Гиббса, система с переменным числом частиц, вертикальное распределение озона, распределение электронов в ионосфере, химический потенциал.

### ВВЕДЕНИЕ

Строго говоря, ни атмосфера, ни ее часть не являются термостатированной системой [1] (за исключением, может быть, тропопаузы, стратопаузы и мезопаузы), и поэтому распределение Гиббса к ней не применимо. Однако такой простой пример, как зависимость счетной концентрации молекул воздуха от высоты, получаемая из барометрической формулы, наводит на мысль, что термостатированность является скорее достаточным, нежели необходимым условием применимости вышеназванного распределения. В настоящей работе предпринята попытка применить распределение Гиббса для параметризации вертикального распределения концентрации озона (ВРО) в стратосфере и электронов в ионосфере (NeH). Такая параметризация помогает успешно регуляризовать некорректную обратную задачу восстановления профилей атмосферных компонентов, как показано в нашей работе [2] на примере ВРО.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА В СТРАТОСФЕРЕ И ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Как известно, распределение Гиббса связывает плотность частиц  $\omega$  в окрестности точки  $X$  фазового пространства с гамильтонианом  $H(X)$  соотношением

$$\omega(X) = \frac{1}{Z} \exp \left[ -\frac{H(X)}{kT} \right] \quad (1)$$

В нем использованы следующие обозначения:  $Z$  – статистическая сумма;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Для электрически нейтральных молекул озона, как для системы с переменным числом частиц, гамильтониан представляет собой сумму потенциальной энергии и химического потенциала  $v(h)$ . Представив зависимость химического потенциала от высоты  $h$  в соответствии с законом Бугера и с учетом эффекта Форбса, описываемого эмпирическими константами  $B$  и  $\gamma$ , в виде

$$v(h) = v(0) \exp \left[ -\sigma \int_h^\infty n(s) ds + \frac{\gamma}{B - \sigma \int_h^\infty n(s) ds} \right] \quad (2)$$

приходим к дифференциальному уравнению

$$\frac{dR}{dh} = \exp \left\{ -\frac{\mu gh - \exp \left[ N + SR(h) + \frac{\Gamma}{D + R(h)} \right]}{R_g T(h)} \right\} \quad (3)$$

для  $R(h) = -\frac{\sigma}{n(0)} \int_h^\infty n(s) ds$ . В уравнении (3)  $\mu$  – молярная масса воздуха;  $g$  – ускорение земного притяжения;  $R_g$  – универсальная газовая постоянная;  $N, S, D, \Gamma$  – эмпирические константы модели, которые можно найти по данным измерений из регрессионного соотношения, равносильного выражению (3). Следовательно,

$$\ln \left[ R_g T(h) \ln \frac{dR(h)}{dh} + \mu gh \right] = \ln[(-v(0))] + \sigma n(0) R(h) + \frac{\gamma}{B + \sigma n(0) R(h)}.$$

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) этого соотношения тестировался по данным спутниковых измерений ВРО прибором SAGE – II, зонально (с шагом  $3^\circ$ ) и помесечно осредненных за период 1986–2000 гг., и оказался, как видно из рис. 1, ниже не менее 99,5%. Точность восстановления ВРО при решении дифференциального уравнения (3) иллюстрирует рис. 1, б.

Для профилей NeH гамильтониан кроме потенциальной энергии и химического потенциала содержит энергию электростатического взаимодействия, пропорциональную концентрации  $n(s)$  в степени  $4/3$ .

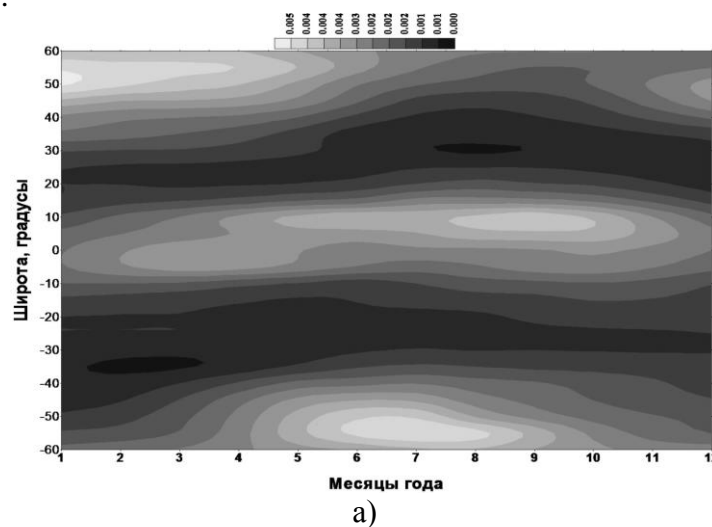
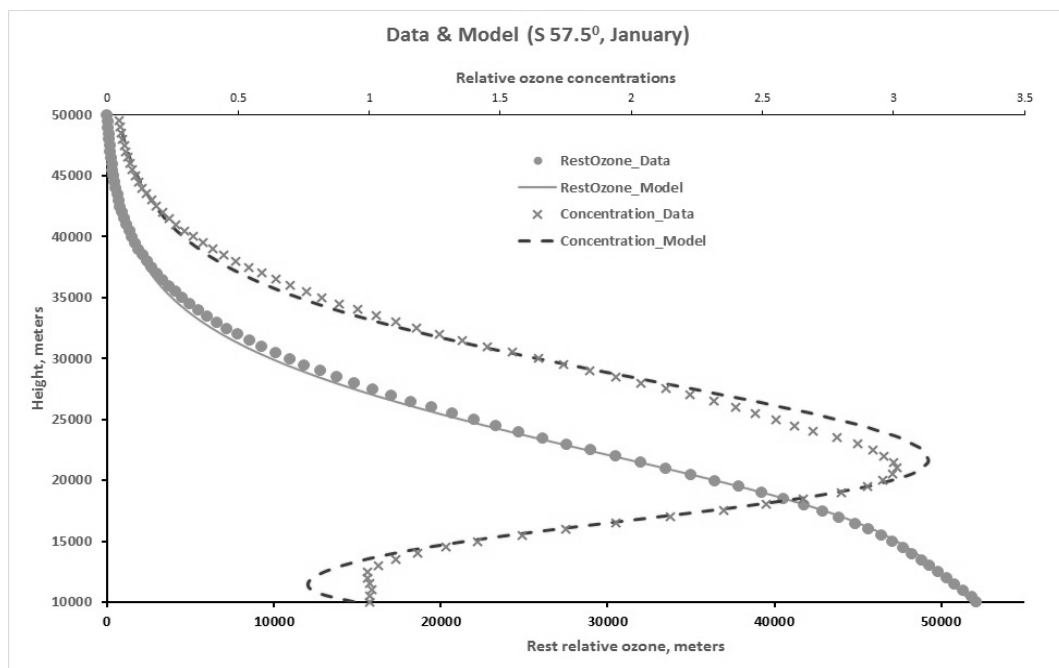


Рис. 1. Широтно-временной разрез отличия  $R_2$  от 1 (а) и сравнение решения уравнения (3) с данными измерений (б) (начало)



б)

Рис. 1. Широтно-временной разрез отличия  $R^2$  от 1 (а) и сравнение решения уравнения (3) с данными измерений (б) (окончание)

Следует отметить, что число взаимодействующих частиц пропорционально  $n(s)$ , а среднее расстояние –  $n(s)^{-1/3}$ . Регрессионное соотношение при этом имеет вид

$$kT(h)\{\ln Z + \ln[n(h)]\} + mgh + \alpha n(h)^{\frac{4}{3}} + v \exp\left(-\sigma \int_h^\infty n(s) ds\right) = 0, \quad (4)$$

где  $\ln Z$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma$ , и  $v$  – параметры модели, определяемые методом наименьших квадратов по данным измерений. Коэффициент детерминации составил 99,6%, а результаты тестирования показаны на рис. 2.

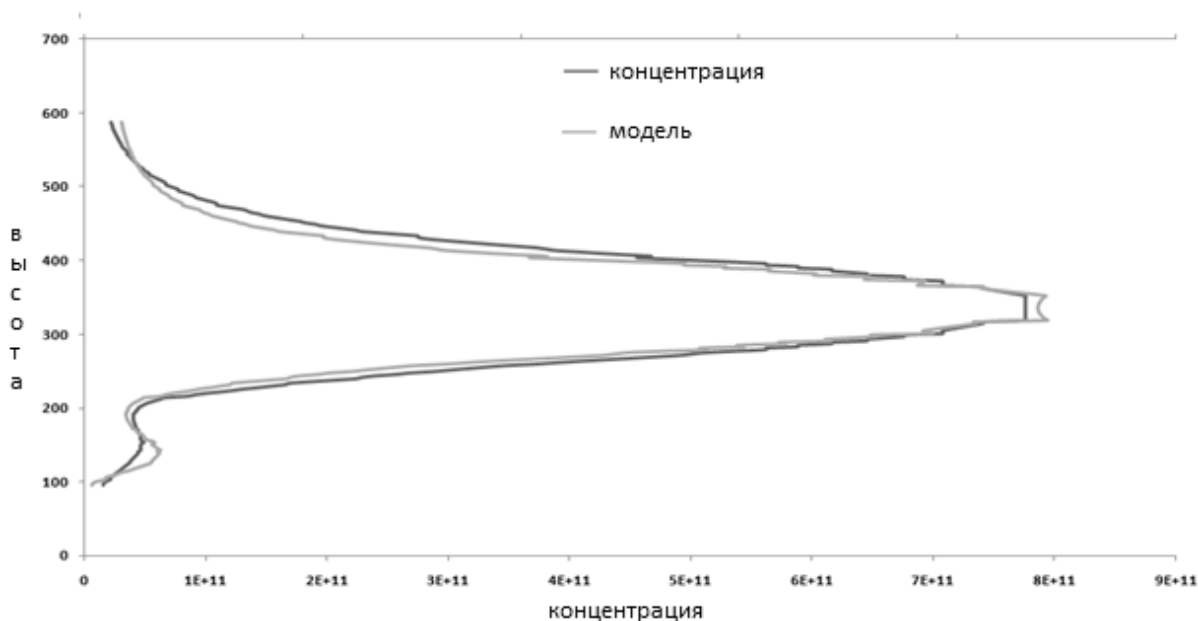


Рис.2. Сравнение модельных и исходных данных NeH профилей

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Распределение Гиббса можно применять в нетермостатированных системах, если характерный размер слоя установления термодинамического равновесия мал по сравнению с масштабом изменчивости концентрации.

2. Распределение вполне удовлетворительно описывает высотные профили концентрации озона в стратосфере и электронов в ионосфере.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-05-00901.*

## Список используемых источников

1. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология: учебник. – 5-е, изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2001. – 431 с.

2. Романов Р.Г., Крученицкий Г.М., Галкин К.А. Параметризация вертикального распределения озона с помощью функций Лагерра // Труды 57-й научной конференции МФТИ «Аэрофизика и космические исследования». – М.[Долгопрудный-Жуковский]: МФТИ, 2014. – С.100–103.

А.Н. Ефременко,  
*кандидат техн. наук;*  
Н.О. Моисеева,  
*кандидат техн. наук;*  
А.Н. Подковырин,  
*кандидат техн. наук;*  
В.В. Черный,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВС РФ**

В статье рассмотрена возможность применения современных технологий мезомасштабного гидродинамического прогнозирования с использованием процедуры ассимиляции данных наблюдений в интересах гидрометеорологического обеспечения ВС РФ. Приведено обоснование актуальности создания прогностического программно-технического комплекса гидрометеорологического обеспечения ВС РФ.

Ключевые слова: гидрометеорологическое обеспечение, специализированная гидрометеорологическая информация, гидродинамическая модель прогноза, ассимиляция данных, программно-технический комплекс.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Характер требуемой для гидрометеорологического обеспечения (ГМО) ВС РФ гидрометеорологической информации существенно различается как по составу учитываемых гидрометеорологических параметров, так и по пространственно-временным масштабам в зависимости от задач, решаемых ВС РФ в различных гидрометеорологических условиях (ГМУ).

Значительный объем требуемой для ГМО ВС РФ гидрометеорологической информации (ГМИ) можно получить на основе применения гидродинамических методов прогнозирования. Необходимо заметить, что важнейшим компонентом современных гидродинамических технологий являются системы усвоения данных гидрометеорологических наблюдений [1, 2].

В настоящее время обеспечение объединений видов ВС РФ и родов войск прогностической ГМИ осуществляют организации и учреждения Росгидромета согласно заявкам штабов военных округов, флотов (флотилий), подаваемым в координирующие территориальные управления Росгидромета. Это обусловлено тем, что оперативные технологии гидродинамического прогноза, основанные на спектральной модели атмосферы, реализованы в нашей стране только в Гидрометцентре России. При таком принципе организации ГМО трудно добиться выполнения требований, предъявляемых ВС РФ к ГМО, по следующим параметрам:

- специализации ГМИ под решаемые задачи;
- оперативности ее получения;
- точности и пространственно-временному разрешению.

Кроме того, сам факт запроса специализированной ГМИ от Росгидромета может привести к раскрытию планов и содержания задач, решаемых ВС РФ в различных условиях военно-политической обстановки, поэтому целесообразно создать на базе подразделений Гидрометеорологической службы (ГМС) ВС РФ оперативного уровня программно-технический комплекс гидродинамического прогнозирования (ПТК ГП) специализированной ГМИ, необходимой для ГМО ВС РФ.

## МЕЗОМАСШТАБНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ

Для реализации мезомасштабной гидродинамической модели атмосферы (ГДМА) ПТК ГП должен иметь технические возможности для подготовки (при поддержке Росгидромета) анализов и кратко- и среднесрочных прогнозов погоды с максимально возможным высоким качеством, детализацией и оперативностью.

Выходная продукция ГДМА должна включать анализы и прогнозы приземных параметров свободной атмосферы, интерпретированные прогнозы конкретных метеорологических параметров в форме карт, текстовых сообщений или графических материалов по заданным районам.

Отметим основополагающие требования к базовой модели кратко- и среднесрочного прогнозирования, реализуемой в подразделениях ГМС ВС РФ оперативного уровня [3, 4]:

а) обеспечение выпуска необходимого перечня продукции с учетом особенностей физико-географического положения региона (планирования применения ВС РФ) и его климатических характеристик;

б) возможность технологически легко настраиваться на любую выбранную область прогноза;

в) возможность изменения горизонтального и вертикального разрешения;

г) возможность выбора схем параметризации физических процессов через входные параметры без перестроек в программной реализации;

д) возможность вывода прогностической продукции с переменной детализацией во времени с целью уточнения сроков начала (окончания) прогнозируемых явлений погоды, а также эффективного использования выходной продукции модели в различных прогностических расчетах и моделях прогнозирования специального назначения;

е) наличие доступных описания и исходных текстов программных модулей интегрированной системы исходных уравнений и схем параметризаций физических процессов.

Реализация мезомасштабной гидродинамической модели атмосферы возможна при следующих условиях [2–5]:

– использовании полной негидростатической системы уравнений;

– использовании в качестве вертикальной координаты, повторяющей рельеф сигма, или гибридной координаты;

– применении в качестве горизонтальной координаты абсциссы декартовой системы координат (выбор проекции зависит от предполагаемого района прогноза);

– использовании для лучшей постановки боковых граничных условий технологии телекопизации (вложенные сетки) и получении прогностической информации от глобальной модели;

– решении задачи постановки начальных условий (или путем составления собственной схемы ассимиляции данных наблюдений, или путем обеспечения связи с результатами прогнозирования по глобальной модели атмосферы).

Приведенным выше требованиям наиболее полно соответствует мезомасштабная модель атмосферы *Weather Research and Forecasting (WRF)* [2].

Важно учитывать, что качество прогноза в очень большой степени зависит от начальных условий, т.е. от значений метеорологических величин в узлах регулярной сетки в начальный момент времени, от которого составляется прогноз. Эти значения должны оптимально точно описывать истинное состояние атмосферы. Ошибки в начальных данных могут привести к значительным ошибкам в оценке будущего состояния атмосферы. Чтобы достичь оптимальной оценки текущего состояния атмосферы используется процедура ассимиляции.

Ассимиляция является перспективным направлением дальнейшего развития мезомасштабного численного прогнозирования в условиях развития высокопроизводительных вычислительных систем и появления больших массивов наблюдаемой новейшими наблюдательными системами ГМИ.



К перспективным источникам ГМИ относятся: радиолокационная сеть современных ДМРЛ, спутниковые системы, средства зондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, передвижные автоматизированные метеостанции и др.

### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЬЮ

В ходе выполнения исследований в рамках НИР «Скальщик-14» коллективом авторов были проведены численные эксперименты с мезомасштабной прогностической моделью WRF. Проведена серия численных экспериментов с прогнозом разной заблаговременности (24 ч и пять суток) в летний (от 10 мая 2012 года) и зимний (от 14 февраля 2012 года) периоды с моделью на сетке с разным разрешением – 15 км и 5 км.

Были получены прогнозы следующих метеорологических величин: давления воздуха, температуры воздуха, ветра, влажности воздуха у поверхности Земли; вертикальных профилей температуры воздуха, ветра, плотности воздуха, влажности воздуха, давления; количества облачности; количества осадков; высоты верхней и нижней границ облачности и толщины облаков; температуры воды; снежного покрова; рельефа местности с разрешением до двух секунд; типа и состояния грунта; влажности и температуры почвы; инверсии температуры воздуха в приземном слое. Прогноз с заблаговременностью 24 ч рассчитывался около 20 мин.

Результаты прогноза по модели WRF полей давления, приведенного к уровню моря, и температуры подстилающей поверхности на 15 февраля 2012 года на расчетной сетке с шагом 5 км представлены на рис. 1 и 2.

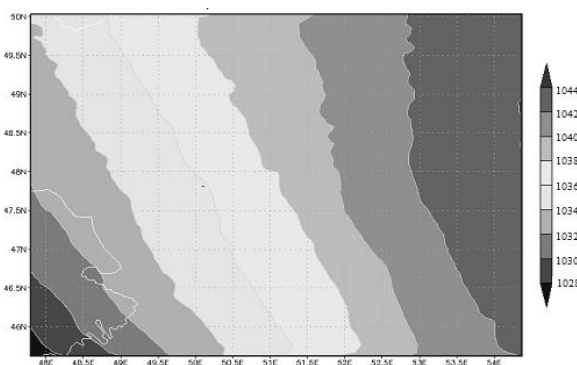


Рис. 1. Прогностическое поле давления, приведенного к уровню моря

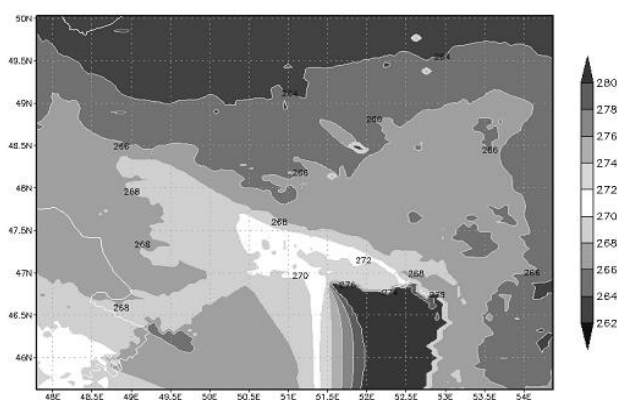


Рис. 2. Прогностическое поле температуры подстилающей поверхности

Сравнение прогностических полей давления, приведенного к уровню моря, и температуры подстилающей поверхности, показанных на рис. 1 и 2, с полями их фактических значений за те же сроки свидетельствует о высоком качестве гидродинамического прогноза.

В результате предварительных расчетов была исследована зависимость качества прогноза от различных схем параметризаций физических процессов, от разрешения модельной сетки и от заблаговременности прогноза.

В качестве иллюстрации вышесказанного на рис. 3 представлена средняя абсолютная ошибка (MAE) прогноза влажности воздуха в зависимости от схемы параметризации конвекции (*K-F*, *G-D*) и от разрешения сетки (10 и 25 км) для заблаговременности от 1 до 5 сут.

Для подтверждения работоспособности мезомасштабной модели атмосферы *WRF* на базе ПТК ГП производилось сравнение точности полученных с помощью нее прогнозов полей метеорологических величин с точностью таких же прогнозов, полученных с помощью других отечественных и зарубежных моделей атмосферы [6].

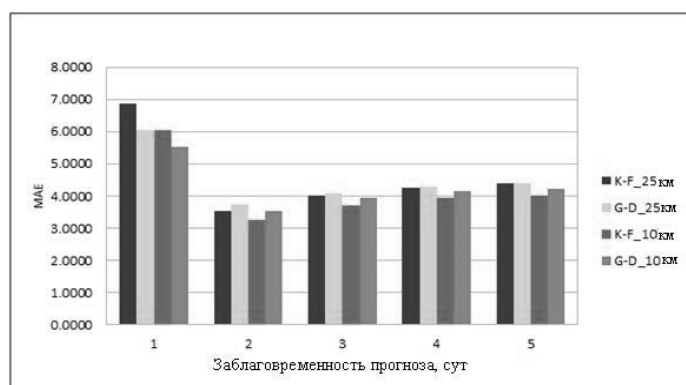


Рис. 3. Средняя абсолютная ошибка прогноза влажности (%) для заблаговременности от 1 до 5 суток

Сравнительное оценивание выполнялось для прогнозов температуры воздуха у поверхности Земли. Оценка качества прогнозов на срок до 3 суток проводилась для синоптических станций, расположенных на европейской территории России.

Сравнение точности прогнозов температуры воздуха по различным моделям показало, что мезомасштабные модели имеют большую точность по сравнению с региональной и глобальными моделями Гидрометцентра России для всех периодов заблаговременности прогноза температуры воздуха. Эта точность (1,7–3,8 градуса) даже несколько хуже точности прогнозов температуры, достигнутой во время численных экспериментов с мезомасштабной моделью атмосферы *WRF*, что подтверждает эффективность ее реализации в разрабатываемом ПТК ГП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных оценок можно сделать вывод о том, что наиболее перспективным направлением повышения качества ГМО ВС РФ является реализация современных технологий мезомасштабного гидродинамического прогнозирования на базе ПТК ГП с применением процедуры ассимиляции данных наблюдений, полученных от различных наблюдательных гидрометеорологических систем.

ПТК ГП целесообразно применять в подразделениях ГМС ВС РФ на уровне округов, флотов (флотилий), командований, что позволит оперативно и автономно решать основные задачи ГМО ВС РФ по обеспечению органов военного управления специализированной ГМИ в районах действий войск (сил) и повысить эффективность их применения с учетом текущих и прогнозируемых гидрометеорологических условий.

### Список используемых источников

1. Вильфанд Р.М., Васильев А.А., Шестакова Н.А. Гидрометцентр России XXI века // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 3–31.
2. Ривин Г.С. Современные системы мезомасштабного прогноза погоды: состояние и перспективы // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010.
3. Doms G., Shaettler U. A description of the Nonhydrostatic Regional Model LM. Part. 1: Dynamics and Numerics. – Germany, 2002. – 134 p.
4. Разработать экспериментальную технологию подготовки численных краткосрочных прогнозов погоды в ДВ-регионе на базе негидростатической модели WRF-ARW и вычислительных средств РСМЦ Хабаровск: отчет о НИР / ГУ «Гидрометцентр России». – М., 2010. – 16 с.
5. Прессман Я., Пекелис Е.М., Кисельникова В.З. Негидростатическая модель локального прогноза погоды Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 59–81.
6. Багров А.Н. Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник. – 2008. – № 35. – С. 3–20.

Н.В. Бахметьева,

*доктор физико-математических наук;*

В.Д. Вяхирев;

Е.Е. Калинина

Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ  
имени Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕЕ**

В работе приводятся результаты диагностики природных явлений в нижней ионосфере Земли методом, основанным на воздействии на ионосферу излучением мощного наземного станда с созданием искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы. Измерения характеристик пробных радиоволн, обратно рассеянных неоднородностями, дают сведения о важнейших параметрах нейтральной и плазменной составляющих атмосферы. Представлены результаты исследований ионосферных эффектов солнечного затмения, особенностей заходно-восходных явлений в нижней ионосфере, аэрономии области D.

Ключевые слова: нижняя ионосфера, плазма, нейтральная атмосфера, нагревный стенд, искусственные периодические неоднородности, пробные радиоволны, обратное рассеяние, затмение Солнца, заходно-восходные явления.

## **ВОЗМУЩЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ И СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Область высот, относящаяся к нижней ионосфере Земли и включающая в себя мезосферу и нижнюю термосферу, является объектом наших исследований. Диагностика этой во многом переходной области представляет собой одну из актуальных задач физики атмосферы и физики космической плазмы. С одной стороны, эта область существенно влияет на эффективность работы информационно-коммуникационных систем, с другой – обеспечивает взаимодействие тропосферы, формирующей погоду и климат, и термосферы, регулируемой солнечной активностью. В течение ряда лет для исследования регулярного (естественного) состояния ионосферы применяется метод, основанный на искусственном воздействии на нее мощным высокочастотным радиоизлучением. Одним из проявлений такого воздействия служит создание искусственной квазипериодической структуры при излучении в зенит мощной электромагнитной волны КВ-диапазона. В поле стоячей волны, образующейся в результате взаимодействия падающей на ионосферу и отраженной от нее радиоволн, вследствие неравномерного нагрева плазмы возникают неоднородности температуры и концентрации электронов, которые релаксируют после окончания искусственного воздействия. Зондирование искусственных периодических неоднородностей (ИПН) на стадии их релаксации с измерением амплитуды и фазы рассеянного ими сигнала позволяет определять большое число параметров нейтральной и плазменной составляющих атмосферы на высотах 50–130 км [1]. Для зондирования ИПН используются радиоволны той же частоты и поляризации, что и для искусственного возмущения ионосферы. В последние годы разработан и реализован в эксперименте новый метод практически одновременного создания ИПН с двумя разными пространственными масштабами [2, 3]. Результаты экспериментов последних лет приведены в [4–9]. Они показывают, что метод, основанный на создании ИПН, является эффективным при исследовании многих природных процессов.

**Реакция нижней ионосферы на частные солнечные затмения.** Ионосфера реагирует на затмения Солнца уменьшением критических частот с одновременным ростом действующих высот отражения, уменьшением полного электронного содержания, снижением поглощения в области D и значительным уменьшением электронной температуры области F, изменением направления потока плазмы [5]. Во время солнечных затмений иногда наблюдались внезап-

ное усиление экранирующего слоя  $E_s$  и значительный рост рассеянного сигнала от области  $E$  [10]. Отмечались изменения в геомагнитных вариациях [11]. Приведенные примеры не исчерпывают всего многообразия ионосферных эффектов в ионосфере во время затмений Солнца. В работе приведены результаты наблюдений вблизи г. Нижнего Новгорода ионосферных эффектов частного солнечного затмения 20.03.2015 с максимальной фазой 0,586 методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН. Исследовались временные вариации сигнала, рассеянного неоднородностями, их изменения, коррелирующие с прохождением лунной тени по диску Солнца. На рис. 1 в координатах «действующая высота-время» приведена запись амплитуды рассеянного сигнала на высотах нижней ионосферы. Белыми вертикальными линиями показаны времена начала, максимальной фазы и окончания затмения. Хорошо видны рассеянные сигналы от ИПН в области  $D$ , области  $E$ , от спорадического слоя  $E$ , который регистрировался также и на ионограммах. Во время затмения зарегистрировано увеличение амплитуд рассеянных сигналов в области  $E$  на 30–40 дБ, обусловленное уменьшением поглощения и расширения диапазона высот приема рассеянных сигналов. До и после окончания затмения сигналы, рассеянные искусственными неоднородностями в области  $D$ , были сравнимы по амплитуде с сигналами от неоднородностей области  $E$ , что в экспериментах по наблюдению ИПН наблюдается крайне редко. Во время затмения были зафиксированы характерный для перехода к ночному режиму ионосферы рост высоты рассеянных сигналов в области  $D$  и расслоение области  $D$  вблизи максимальной фазы. Наблюдались необычные рассеянные сигналы с большой амплитудой и длительной релаксацией после окончания воздействия на ионосферу с высот мезопаузы 86–88 км, которые, как правило, отсутствуют из-за роста на этих высотах концентрации атомарного кислорода, препятствующего образованию ИПН за счет прилипания электронов к молекулам кислорода при тройных соударениях [1, 6]. Во временных вариациях характеристик рассеянных сигналов, особенно скорости вертикального движения плазмы, проявлялись интенсивные волновые движения с периодами, характерными для ВГВ.

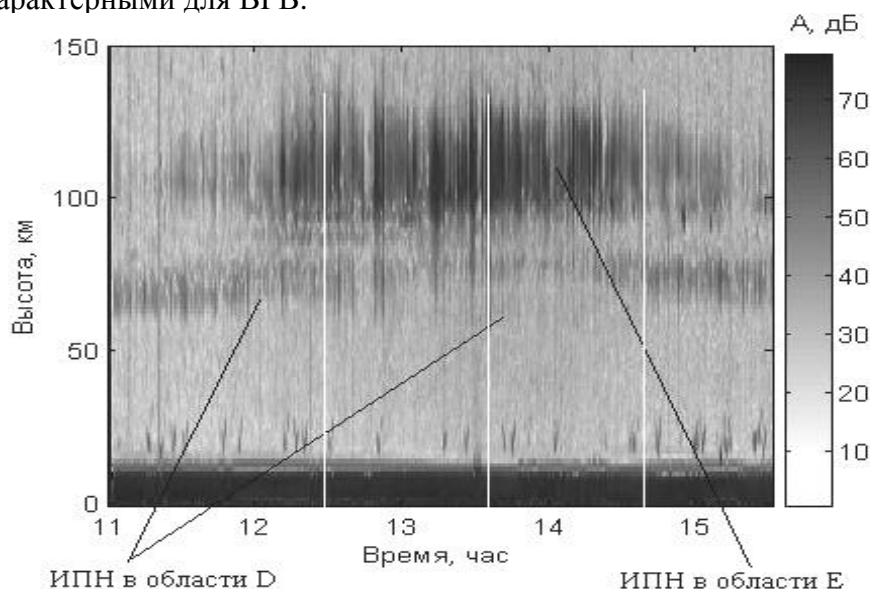
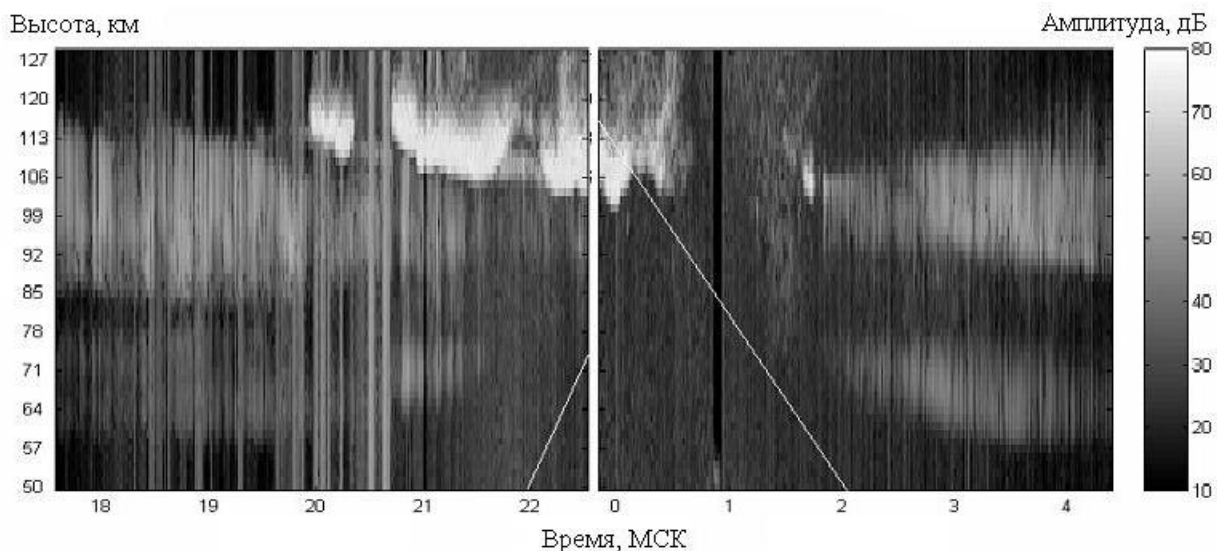


Рис. 1. Амплитуда сигнала, рассеянного ИПН, в координатах «действующая высота-время» в нижней ионосфере до, во время и после окончания затмения Солнца 20 марта 2015 года

## ЗАХОДНО-ВОСХОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕЗОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ

Диагностика ионосферы в периоды захода и восхода Солнца проводилась летом 2000, 2001 и 2015 годов. На рис. 2 показана зависимость амплитуды рассеянного сигнала от высоты и времени. На ней видны рассеянные сигналы от ИПН в области  $E$  (высоты 90–115 км),

области  $D$  (высоты 60–80 км) и спорадический слой  $E$ , промодулированный атмосферной волной, который появился перед заходом Солнца, постепенно снижался до высоты 100 км и пропал после восхода. Хорошо известно, что область  $D$  претерпевает сильные изменения на заходе и восходе Солнца, что подтверждают измерения методом ИПН. Амплитуда рассеянного сигнала уменьшалась с ростом зенитного угла Солнца на заходе и росла с его уменьшением на восходе, обнаруживая при этом определенную асимметрию. Она проявляется в том, что на заходе Солнца рассеянные ИПН сигналы имели большую амплитуду и занимали больший высотный интервал, чем на восходе. Зафиксировано, что на восходе Солнца значительно увеличивается концентрация атомарного кислорода, что приводит к росту скорости отщипывания электронов, в результате чего практически прекращается действие механизма образования ИПН, характерного для области  $D$ . Индикатором этого процесса является полное пропадание рассеянного сигнала [4, 12].



*Рис.2. Амплитуда сигнала, рассеянного ИПН, в координатах «действующая высота-время» в нижней ионосфере на заходе и восходе Солнца по наблюдениям 15 и 16 июня 2001 года*

## АЭРОНОМИЯ ОБЛАСТИ $D$

Одним из наиболее важных применений метода ИПН является экспериментальное исследование  $D$ -области ионосферы и аэрономических процессов, происходящих в ней. Высотные профили амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала в области  $D$  удалось объяснить на основе модели с одним типом отрицательных ионов кислорода [1, 12]. В нижней части  $D$ -области (ниже высоты 65 км) амплитуда сигнала, рассеянного неоднородностями, и время его релаксации  $\tau$  отражают вариации плотности атмосферы и концентрации молекулярного кислорода в возбужденном состоянии  $^1\Delta_g$ , а на высотах 75–80 км – концентрации атомарного кислорода, что позволяет оценивать концентрацию кислорода в нижней ионосфере. Неоднократно наблюдалось расслоение профиля электронной концентрации области  $D$  (возможно, нижний слой является гипотетическим слоем  $C$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом исследования нижней ионосферы на основе создания искусственных периодических неоднородностей изучены особенности и получены характеристики нижней ионосферы во время регулярных природных явлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по грантам № 13-05-00511, 15-15-0043 и 13-02-12074.

### Список используемых источников

1. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей / В.В. Беликович, Е.А. Бенедиктов, А.В. Толмачева, Н.В. Бахметьева. – Нижний Новгород.: ИПФ РАН, 1999. – 155 с.
2. Новый способ определения электронной концентрации в E-области ионосферы по временам релаксации искусственных периодических неоднородностей / В.В. Беликович, Н.В. Бахметьева, Е.Е. Калинина, А.В. Толмачева // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т.49, №9. – С. 744–750.
3. Высотно-временные вариации электронной концентрации в E-слое ионосферы / А.В. Толмачева, Н.В. Бахметьева, В.Д. Вяхирев и др. // Известия вузов. Радиофизика. – 2011. – Т.54, № 6. – С. 403–414.
4. Заходно-восходные характеристики спорадических слоев ионизации в нижней ионосфере, наблюдаемые методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы / Н.В. Бахметьева, В.В. Беликович, Л.М. Каган, А.А. Понятов // Известия вузов. Радиофизика. – 2005. – Т.48, № 1. – С. 16–32.
5. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Н.Новгороде и Мурманске / В.В. Беликович, В.Д. Вяхирев, Е.Е. Калинина и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2008. – Т.48, № 1. – С. 103–108.
6. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Исследование сумеречной D-области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей // Известия вузов. Радиофизика. – 2002. – Т. 45, № 6. – С. 502–508.
7. Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Толмачева А.В. Искусственные периодические неоднородности, гидродинамические неустойчивости и динамические процессы в мезосфере – нижней термосфере // Известия вузов. Радиофизика. – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 695–711.
8. Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. and Tolmacheva A.V. Perspective ground-based method for diagnostics of the lower ionosphere and neutral atmosphere // Baltic Astronomy. – 2013. – Vol. 22, №1. – P.15–24.
9. G.I. Grigor'ev, N.V. Bakhmet'eva, A.V. Tolmacheva, E.E. Kalinina Relaxation Time of Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma and Diffusion in the Inhomogeneous Atmosphere // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2013. – Vol. 56, Is. 4. – P. 187–196.
10. Effects of solar eclipse on the electrodynamic processes of the equatorial ionosphere: A case study during 11 August 1999 dusk time total solar eclipse over India. R. Sridharan, C.V. Devasia, N. Jyoti et al. // Annales Geophysicae. – 2002. – Vol.20, №12. – P. 1977–1985.
11. The geophysical disturbance during the total eclipse of the 1 August 2008 in Novosibirsk, Russia / I.Y. Babakhanov, A.Y. Belinskaya, M.A. Bizin, et al. // JASTP. – 2013. – Vol. 92. – P.1–6.

Н.Ф. Благовещенская,  
доктор физико-математических наук  
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

## МОДИФИКАЦИЯ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НАГРЕВНОГО КОМПЛЕКСА EISCAT/Heating

Представлены результаты экспериментальных исследований по модификации высокоширотной F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации (X-мода) в зависимости от отношения частоты нагрева  $f_H$  к критической частоте слоя F2 ( $f_H/f_oF2$ ). Полученные результаты свидетельствуют о создании интенсивных искусственных возмущений в ионосферной плазме, включая генерацию мелкомасштабных искусственных неоднородностей, искусственного оптического и узкополосного радиоизлучения ионосферы, образование каналов повышенной плотности электронов вдоль магнитного поля в широком диапазоне частот, возбуждение плазменных линий и усиленных нагревом ионных линий в спектрах сигналов EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн. Рассматриваются возможные механизмы генерации явлений в ионосферной плазме, инициированных воздействием мощных КВ радиоволн X-поляризации.

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, высокоширотная ионосфера, искусственные неоднородности, узкополосное радиоизлучение ионосферы, канал повышенной электронной плотности, радар некогерентного рассеяния радиоволн, искусственная ионосферная турбулентность.

### ВВЕДЕНИЕ

Нелинейное взаимодействие мощных КВ радиоволн обыкновенной поляризации (O-мода) с ионосферной плазмой приводит к возбуждению параметрических неустойчивостей (тепловой и стрикционной). Тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивость (ТПН), развивающаяся на высотах верхнего гибридного резонанса, где частота нагрева равна верхней гибридной частоте  $f_H^2 = f_{UH}^2 = f_p^2 + f_{ce}^2$  (здесь  $f_p$  – локальная плазменная частота и  $f_{ce}$  – электронная гирочастота), вызывает повышение температуры электронов, генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и сопровождается искусственным радиоизлучением ионосферы (ИРИ) [1]. Вблизи высоты отражения мощной КВ радиоволны O-поляризации,  $f_H^2 = f_p^2$ , наблюдается возбуждение электростатических плазменных волн (Лэнгмюровских и ионно-акустических), что приводит к ускорению электронов фоновой плазмы и искусственному оптическому излучению из возмущенной области ионосферы [2].

Мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода) отражается на высоте, где частота плазмы составляет  $f_p^2 = f_H (f_H - f_{ce})$ , что ниже как высоты верхнего гибридного резонанса, так и высоты отражения волны O-поляризации. Так как мощная КВ радиоволна X-поляризации не достигает резонансных высот в ионосфере, только волны с O-поляризацией могут приводить к генерации явлений в F-области ионосферы, обусловленных нелинейным взаимодействием мощных КВ радиоволн с ионосферной плазмой. Однако результаты экспериментальных исследований, выполненных специалистами ААНИИ на высокоширотном КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating при X-нагреве, убедительно продемонстрировали возможность генерации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), оптического излучения в красной (630 нм) и зеленой (557 нм) линиях атомарного кислорода, возбуждение параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости [3–5].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование параметров и условий генерации разнообразных возмущений в высокоширотной F-области ионосферы, обусловленных воздействием мощных КВ радиоволн X-поляризации, в зависимости от отношения частоты нагрева  $f_H$  к критической частоте слоя F2 ( $f_H/f_oF2$ ) по данным комплексных



наблюдений с использованием различных диагностических средств. Исследования выполнялись на высоких частотах нагрева  $f_H$ , лежащих в диапазоне 5,5–8,0 МГц, в широком диапазоне изменений критических частот слоя  $F2$ , когда отношение  $f_H/f_0F2$  менялось от 0,9 до 1,35. Это обеспечило не только возможность сравнения эффектов  $X$ -нагрева при различных отношениях  $f_H/f_0F2$ , но и оценку диапазона частот нагрева выше  $f_0F2$ , в котором такие эффекты наблюдаются. Основное внимание уделено особенностям развития параметрической распад-ной (стрикционной) неустойчивости, поведению параметров ионосферной плазмы, спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы и параметров МИИН в зависимости от отношения частоты нагрева  $f_H$  к критической частоте  $f_0F2$  слоя  $F2$ . Будет также рассмотрено влияние направления излучения волны накачки на интенсивность искусственных возмущений, а также выполнено сравнение между явлениями, возникающими при нагреве высокоширотной ионосферы мощными радиоволнами обыкновенной ( $O$ -мода) и необыкновенной ( $X$ -мода) поляризации. Результаты исследований базируются на данных многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на нагревном комплексе EISCAT/Heating в 2012–2015 годах.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ

Для модификации высокоширотной  $F$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами использовался КВ нагревной комплекс EISCAT/Heating (69,6° N; 19,2° E;  $L = 6,2$ ;  $I = 78^\circ$ ), расположенный в г. Тромсе (северная Норвегия). Эксперименты проводились в дневные и вечерние часы при высокой солнечной активности и спокойных магнитных условиях с использованием фазированной антенной решетки «1» (ФАР 1) КВ нагревного комплекса, обеспечивающей максимальную эффективную мощность излучения  $P_{эфф} = 600 \div 1200$  МВт в зависимости от частоты нагрева. Ширина диаграммы направленности ФАР 1 на уровне половинной мощности составляет порядка 6°. Мощная КВ радиоволна излучалась либо в направлении магнитного зенита (78°), либо в направлениях 90 или 84° циклами 10 мин нагрев/5 мин пауза и 20 мин нагрев/10 мин пауза.

Отклик ионосферной плазмы на воздействие мощной КВ радиоволны необыкновенной поляризации ( $X$ -мода) контролировался с помощью EISCAT радара некогерентного рассеяния (НР) радиоволн на частоте 930 МГц, расположенного в непосредственной близости от нагревного комплекса, CUTLASS (SuperDARN) когерентного КВ радара в Финляндии (63° N, 27° E) и приемного комплекса для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) в полосе 3 кГц, установленного вблизи г. Санкт-Петербурга на расстоянии 1200 км от КВ нагревного комплекса в Тромсе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Регистрация МИИН в высокоширотной  $F$ -области ионосферы при  $X$ -нагреве осуществлялась с помощью когерентного КВ радара CUTLASS, установленного в Ханкасалми (Финляндия). Во всех экспериментах, выполненных на высоких частотах нагрева, регистрировались интенсивные обратно-рассеянные на МИИН сигналы. На рис. 1 представлены результаты наблюдений 28 октября 2013 года при  $X$ -нагреве на частоте 6,96 МГц с 15.30 до 18 UT, когда критические частоты  $f_0F2$  уменьшались от 7,6 до 5,3 МГц. Рис. 1 характеризует поведение мощности рассеянных на МИИН сигналов в зависимости от дальности (Range gate) и мирового времени UT на трех частотах (16, 18 и 20 МГц), соответствующих обратному рассеянию от МИИН с поперечными масштабами  $l_{\perp} \approx 9,3$ ; 8,3 и 7,5 м соответственно. Интенсивные МИИН регистрировались при  $X$ -нагреве как на частотах ниже критической частоты слоя  $F2$  ( $f_H < f_0F2$ ), так и на частотах нагрева, превышающих критическую частоту ( $f_H > f_0F2$ ). При этом по мере уменьшения  $f_0F2$  исчезали МИИН с более мелкими масштабами, но увеличивалась интенсивность МИИН более крупных размеров. После 17 UT наиболее интенсивные

МИИН регистрировались на частоте 16 МГц ( $l_{\perp} \approx 9,3$  м). Размер области, занятой МИИН, варьировался от 60 до 150 км, что существенно превышало размер искусственно возмущенной области ионосферы, определяемой по ширине диаграммы направленности антенной системы нагревного комплекса ФАР 1 на уровне половинной мощности (порядка 30 км).

По данным измерений EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн представляется возможным непосредственно регистрировать возбуждение параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости (parametric decay instability, PDI), когда происходит распад мощной электромагнитной волны  $EMo$  вблизи высоты отражения в высокочастотную (Лэнгмюровскую,  $L$ ) и низкочастотную (ионно-акустическую,  $IA$ ) плазменные волны,  $EMo \rightarrow L+IA$ . Идентификация возникновения плазменных волн осуществляется непосредственно по данным измерений радара HP по появлению плазменных линий на частоте нагрева (HF-induced plasma lines, HFPLs) и усиленных нагревом ионных линий (HF-enhanced ion lines, HEILs) в спектрах рассеянных сигналов. На рис. 2 показаны высотные распределения максимальной интенсивности усиленных нагревом плазменных и ионных линий для того же эксперимента 28 октября 2013 года на частотах нагрева как ниже ( $f_H < f_0F2$ ), так и выше критической частоты слоя  $F2$  ( $f_H > f_0F2$ ).

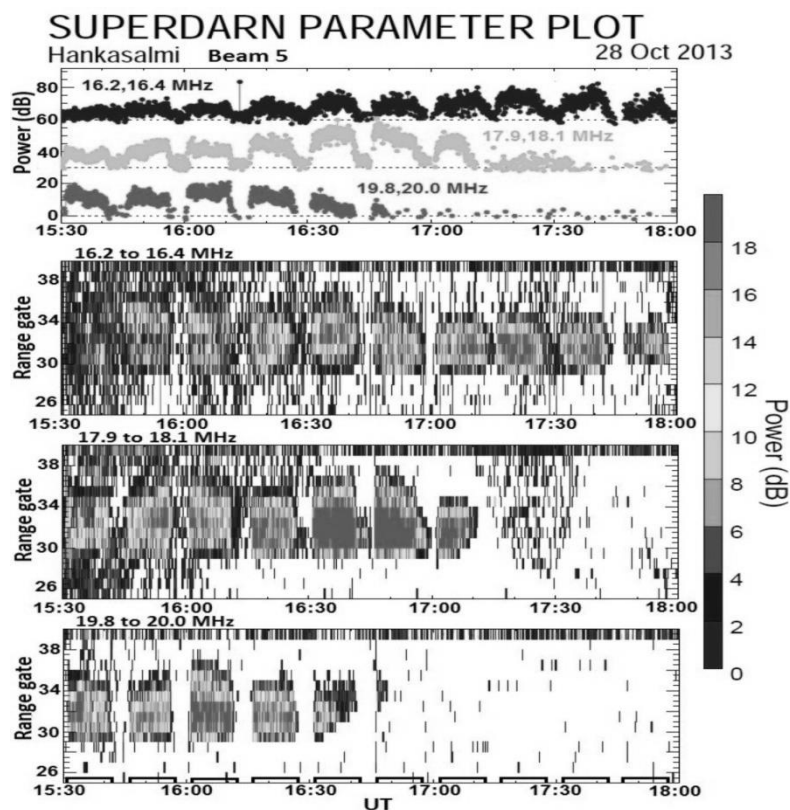


Рис. 1. Результаты наблюдений с помощью радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) (луч 5) на частотах порядка 16, 18 и 20 МГц 28 октября 2013 года с 15.30 до 18.00 UT. Приведено поведение мощности рассеянных сигналов в зависимости от дальности (Range gate) и мирового времени UT. Дальность до центра искусственно возмущенной области ионосферы над Тромсе соответствует 33 «воротам» (Range gate). Циклы нагрева отмечены на осях времени. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на ФАР 1 в направлении магнитного зенита на частоте 6,96 МГц циклами 10 мин нагрев/ 5 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла 550 МВт

Как следует из анализа рис. 2, характер высотных профилей идентичен. Однако диапазон высот, в котором происходит возбуждение Лэнгмюровской и ионно-акустической турбулентностей, существенно шире при X-нагреве на частотах, превышающих  $f_0F2$  ( $f_H > f_0F2$ ).

Результаты многочисленных экспериментов при X-нагреве  $F$ -области высокоширотной ионосферы позволили впервые обнаружить, что наиболее сильные возмущения (возрастание электронной концентрации, интенсивности HFPLs и HFILs) создаются вдоль магнитного поля (эффект магнитного зенита). Более того, при излучении X-волны в вертикальном направлении возрастания  $N_e$  и интенсивности HFPLs и HFILs не регистрировались совсем.

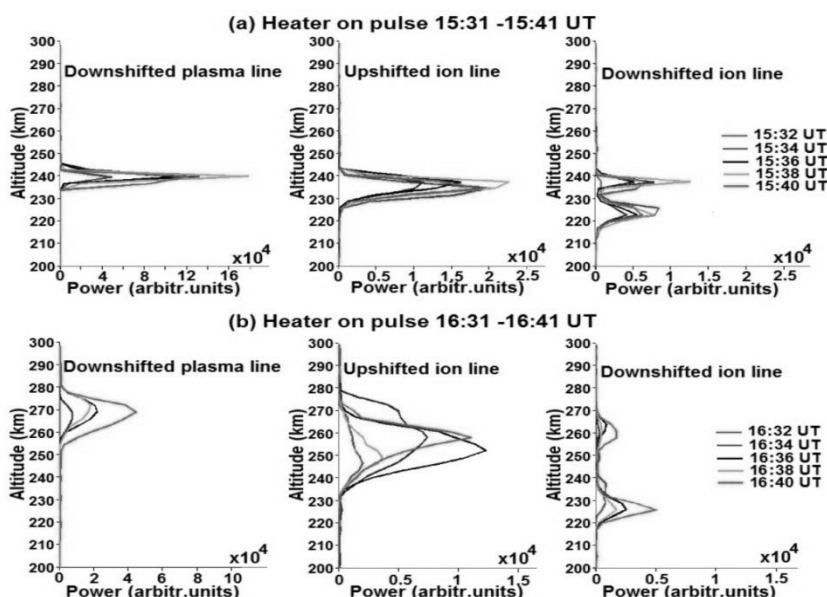


Рис. 2. Высотные профили максимальной интенсивности сдвинутых вниз по частоте плазменных линий HFPLs, а также максимальной интенсивности сдвинутых вверх и вниз по частоте усиленных нагревом ионных линий HFILs для нагревного цикла 15.31 – 15.41 UT в 15.32, 15.34, 15.36, 15.38 и 15.40 UT, когда  $f_H/f_0F2 < 1$  (a) и с 16.31 до 16.41 UT в 16.32, 16.34, 16.36, 16.38, and 16.40 UT, когда  $f_H/f_0F2 > 1$  (b) в период эксперимента при X-нагреве 28 октября 2013 года. Спектры рассеянных сигналов рассчитывались с разрешением по высоте 3 км и временем интегрирования 30 с. (Детали нагрева такие же, как и на рис. 1.)

На рис. 3 показано поведение интенсивности плазменных линий в спектрах сигналов (верхняя панель) и высотно-временное распределение мощности рассеянных сигналов (нижняя панель), полученных по данным измерений радара НР при сканировании искусственно возмущенной области в период нагревного эксперимента в Тромсе 2 ноября 2013 года. Как следует из анализа рис. 3, наиболее интенсивные HFPLs и HFILs при X-нагреве сосредоточены в очень узком диапазоне углов ( $77-79^\circ$ ), соответствующем направлению магнитного поля в Тромсе.

Представляет интерес сравнение эффектов нагрева при излучении мощной КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации. На рис. 4 представлены результаты наблюдений с помощью EISCAT радара некогерентного рассеяния в Тромсе в период О/Х нагрева 3 ноября 2013 года с 15.30 до 18 UT. На рис. 4 показано высотное поведение электронной плотности ( $N_e$ ), температуры электронов ( $T_e$ ) и скоростей ионов ( $V_i$ ), а также вариации  $N_e$  и  $T_e$  на фиксированных высотах.

В период эксперимента мощная КВ радиоволна излучалась на частоте 6,2 МГц в направлении магнитного зенита на О- или X-поляризации. С 15.30 до 17 UT частоты нагрева лежали ниже или вблизи критической частоты  $f_0F2$  ( $f_H/f_0F2 = 0,92 - 1,05$ ). В этих условиях возможно возбуждение эффектов как при О-, так и X-нагреве. После 17 UT, когда критические частоты упали до 5,8 МГц, проводился только X-нагрев. Анализ данных, приведенных на

рис. 4, показал, что возрастание  $N_e$  в широком диапазоне высот, достигающее 100%, наблюдалось только при нагреве на X-поляризации и отсутствовало при O-нагреве. Отметим, что

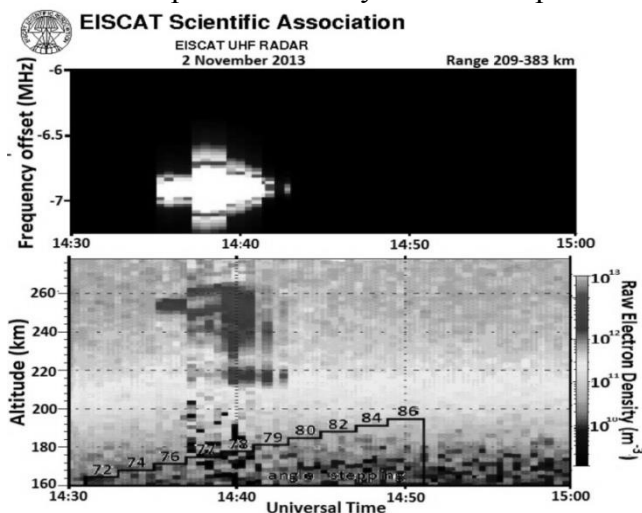


Рис. 3. Поведение интенсивности плазменных линий в спектрах сигналов (верхняя панель) и высотно-временное распределение мощности рассеянных сигналов (нижняя панель),

полученных по данным измерений радара НР при сканировании искусственно

возмущенной области, в период нагревного эксперимента в Тромсе 2 ноября 2013 года.

Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на частоте 6,96 МГц в магнитный зенит с 14.31 до 14.51 UT. Радар НР работал в режиме сканирования при изменении углов измерения в последовательности: 72-74-76-77-78-79-80-82-84-86° (2 мин при каждом угле).

Эффективная мощность излучения составляла  $P_{эфф} = 560$  МВт

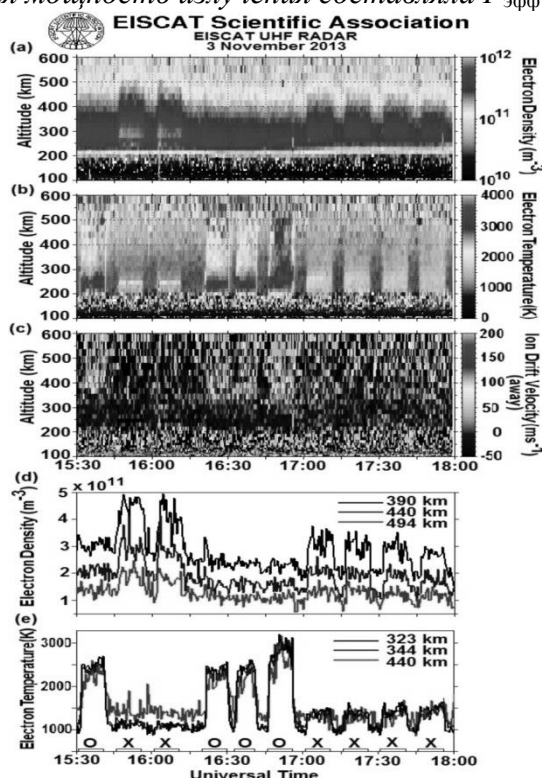


Рис. 4. Высотно-временное поведение электронной плотности ( $N_e$ ), температуры электронов ( $T_e$ ) и скоростей ионов ( $V_i$ ), а также вариации  $N_e$  и  $T_e$  на фиксированных высотах по данным радара НР в Тромсе 3 ноября 2013 года с 15.30 до 18 UT. Мощная КВ радиоволна O- или X-поляризации излучалась на частоте 6,2 МГц в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев/5 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла 450 МВт. Циклы нагрева и поляризация мощной КВ радиоволны показаны на оси времени

возрастание  $N_e$ , регистрировалось как при  $f_H \geq f_0F2$ , так и  $f_H < f_0F2$ . Повышение  $N_e$  сопровождалось возрастанием температуры электронов  $T_e$ , которое достигало 40–60% при X-нагреве на частотах выше критической частоты ( $f_H \geq f_0F2$ ). O-нагрев высокоширотной F-области ионосферы при  $f_H \leq f_0F2$  сопровождался сильным возрастанием  $T_e$  (до 200–300%) и генерацией выноса потоков ионов из ионосферы.

В экспериментах, выполненных на KB нагревном комплексе EISCAT/Heating, впервые было обнаружено и зарегистрировано на расстоянии 1200 км от нагревного комплекса узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) при нагреве высокоширотной F-области ионосферы мощной KB радиоволной X-поляризации.

В качестве примера на рис. 5 показана спектрограмма нагревного сигнала в полосе 600 Гц, зарегистрированная на расстоянии 1200 км от нагревного комплекса при альтернативном O/X-нагреве в направлении магнитного зенита 27 октября 2013 года на частоте 7,953 МГц. Результаты выполненных экспериментов убедительно свидетельствуют о возбуждении различных спектральных компонент в спектре узкополосного ИРИ при X-нагреве, таких, как ионно-акустические, электростатические ионно-циклотронные и ионные Бернштейновские волны, регистрировавшиеся на расстоянии 1200 км от KB нагревного комплекса. Сделано предположение, что эти узкополосные спектральные компоненты могут быть связаны с процессом стимулированного Брюллионовского рассеяния.

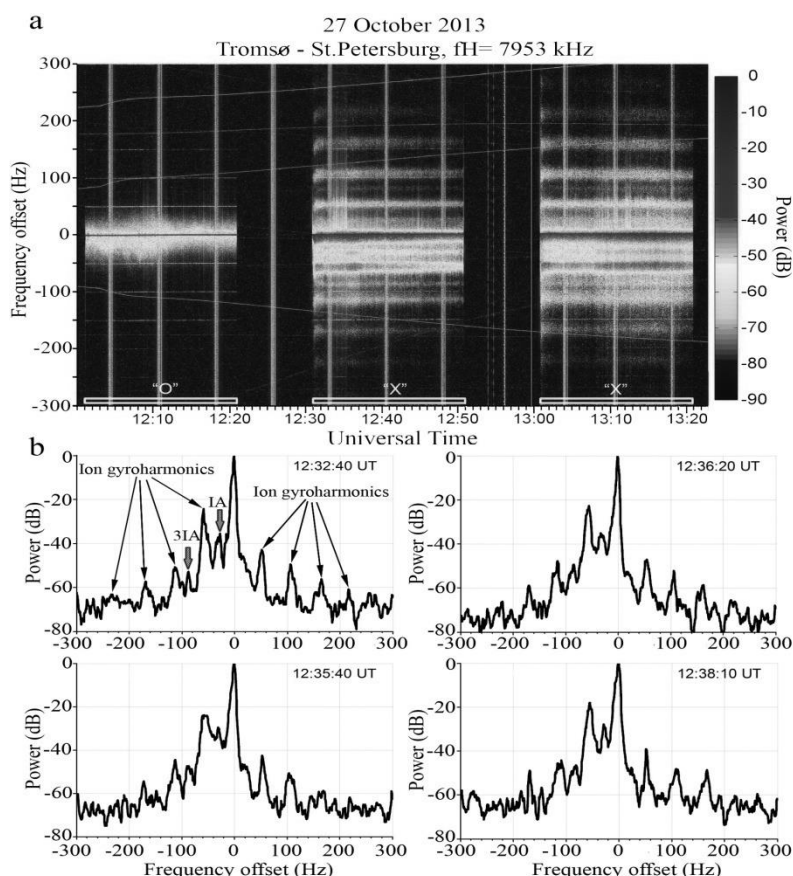


Рис. 5. Спектрограмма нагревного сигнала в полосе 600 Гц, зарегистрированная при альтернативном O/X-нагреве вблизи С.-Петербурга 27 октября 2013 года с 12 до 13.30 UT (a) и спектры, полученные в 12.32.40, 12.35.40, 12.36.20, and 12.38.10 UT в течение цикла X-нагрева с 12.31 до 12.51 UT (b). Мощная KB радиоволна излучалась на частоте 7,953 МГц в направлении магнитного зенита циклами 20 мин нагрев/10 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла 650 МВт. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной KB радиоволны показаны на оси времени верхней панели

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги результатов исследований на нагревном комплексе EISCAT/Heating в Тромсе, представляется возможным выделить следующее. Показана возможность создания интенсивных возмущений в высокоширотной  $F$ -области ионосферы при  $X$ -нагреве на высоких частотах ( $f_H = 5,5 \div 8,0$  МГц) как при  $f_H/f_0 F2 > 1$ , так и при  $f_H/f_0 F2 \leq 1$ , включая генерацию МИИН, возбуждение параметрической распадной неустойчивости (генерация Лэнгмюровских и ионно-акустических плазменных волн), возрастание электронной концентрации до 100% в широком диапазоне высот вдоль направления магнитного поля.

Установлено, что при  $X$ -нагреве на высоких частотах интенсивные усиленные нагревом плазменные и ионно-акустические линии в спектре сигналов радара НР (HFPLs и HFILs) существуют одновременно с мелкомасштабными искусственными неоднородностями в течение всего цикла нагрева.

Обнаружен эффект магнитного зенита при  $X$ -нагреве, когда наиболее интенсивные возмущения в ионосферной плазме создаются вдоль направления магнитного поля. Было выполнено сравнение явлений, возбуждаемых воздействием мощных КВ радиоволн обыкновенной ( $O$ -мода) и необыкновенной ( $X$ -мода) поляризации.

Выявлено, что только при  $X$ -нагреве в направлении магнитного зенита происходит возбуждение разнообразных узкополосных спектральных компонент в ИРИ спектре, таких, как ионно-акустические, электростатические ионно-циклотронные и ионные Бернштейновские волны, регистрировавшиеся на значительном (более 1000 км) расстоянии от КВ нагревного комплекса. Сделано предположение, что эти узкополосные спектральные компоненты могут быть связаны с процессом стимулированного Брюллионовского рассеяния.

## Список используемых источников

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, №11. – С. 1145–1177.
2. Langmuir turbulence in ionospheric plasma / A.V. Gurevich, H.C. Carlson, Y.V. Medvedev, K.R. Zybin // Plasma Physics Reports. – 2004. – Vol. 30. – P. 995–1005.
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, M.T. Rietveld, I.M. Ivanova, L.J. Baddeley // Geophys. Res. Lett. – 2011.
4. Plasma modifications induced by an X-mode HF heater wave in the high latitude  $F$  region of the ionosphere. / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, T.K. Yeoman, M.T. Rietveld, I. Häggström, I. M. Ivanova // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2013. – Vol.105, 106. – P.231–244.
5. Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping / N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, M. Kosch, T. Sergienko, U. Brändström, T. K. Yeoman, I. Häggström // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2014. – Vol.119. – P. 10, 483–10, 498.

М.С. Болдырев;  
С.А. Желавский;  
В.А. Никольский,  
*кандидат техн. наук*  
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, г. Сергиев Посад

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТА РАКУРСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАБОТЫ НАГРЕВНОГО СТЕНДА НААРР С ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Оценены возможности использования дальномерно-пеленгационного метода для мониторинга работы зарубежного нагревного стенда НААРР. Определены требования к местам расположения наземных комплексов мониторинга, а также требования к мощностным характеристикам данных комплексов.

Ключевые слова: ракурсное рассеяние, радиоволна, радиомониторинг.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В зарубежных странах активно исследуются методы решения военно-прикладных задач с помощью активных воздействий на ионосферу. В связи с этим возникает актуальная задача оперативного обнаружения и определения параметров таких воздействий, а также увязки фактов воздействия с природными возмущениями на территории нашего государства. Данная задача может быть решена с помощью радиомониторинга.

Исследования показывают, что контроль работы зарубежных нагревных стендов (НС) может быть осуществлен путем регистрации первичного излучения самого НС (волны накачки), а также вторичного излучения искусственно возбужденной ионосферы в различных частотных диапазонах.

Предметом исследования в данной работе является возможность регистрации ракурсно рассеянного зондирующего КВ и УКВ излучения от искусственно созданных НС мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в верхней ионосфере. Физика этого явления рассмотрена в [1].

МИИН образуют ретранслятор (набор ионосферных зеркал) для радиосигналов КВ и нижней части УКВ диапазона частот. Эффективные поперечники области рассеяния (ОР) радиоволн достигают величин  $\sim 10^6\text{--}10^8\text{ м}^2$  при суммарной мощности передатчиков стенда  $\sim 2\text{ МВт}$  [2] для частот до 80 МГц, поэтому прием зондирующих сигналов, ракурсно рассеянных на МИИН, является хорошим индикатором работы НС в режиме модификации верхней ионосферы.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАДИОМОНИТОРИНГА**

При регистрации работы стационарного НС его расположение изначально определено, а параметры функционирования неизвестны, что приводит к необходимости вести непрерывный мониторинг работы стенда. Способ мониторинга, использующий в своей основе эффект ракурсного рассеяния, может базироваться на дальномерно-пеленгационном методе [3]. Подобный способ мониторинга естественных ионосферных неоднородностей описан в патенте [4]. Для регистрации работы НС в режиме модификации верхней ионосферы предлагается следующее. Зарубежный НС излучает мощную волну накачки, в результате чего на высотах 200–400 км образуется ОР. Передатчик излучает зондирующие сигналы в направлении действия диаграммы направленности НС (на ОР). На ОР эти сигналы испытывают ракурсное рассеяние и при определенных условиях попадают в приемник. По характеристикам рассеянного сигнала координаты ОР определяются как координаты точки пересечения дуги боль-

шого круга, направление которой задается пеленгом, и окружности с радиусом, равным дальности и центром в приемном пункте. Основным недостатком данного способа является зависимость точности определения местоположения ОР от погрешности в определении двумерного угла рассеянного излучения.

Реализация такого способа мониторинга предполагает нахождение излучателя и приемника зондирующих сигналов на контуре обратного рассеяния или на ракурсно сопряженных контурах в пределах территории РФ [5]. При этом антенны приемника и передатчика, образующие комплекс мониторинга, должны ориентироваться на ОР. При выполнении этих условий интенсивность рассеянного радиосигнала должна быть достаточна для регистрации приемником.

Необходимо отметить, что радиоволны КВ диапазона с разной частотой падают на МИИН под разными углами (вследствие различной степени рефракции). Это значит, что углы отражения от МИИН у волн с разными частотами будут отличаться. Поэтому для реализации предлагаемого способа необходимо использовать излучатель с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Тогда каждой составляющей зондирующего ЛЧМ сигнала моды будут соответствовать свой контур ракурсного рассеяния. Следовательно, при зондирующем ЛЧМ излучении в КВ диапазоне длин волн в приемник будет приходиться не весь спектр ЛЧМ сигнала, а лишь те его рассеянные моды, ракурсный контур которых проходит через пункт приема.

Для реализации предложенного метода радиомониторинга необходимо решить задачу расчета дальности до ОР по измеренному времени распространения зондирующего ЛЧМ сигнала. Ее решение проводится численно, поскольку радиоволна распространяется в неоднородной среде с особыми параметрами. В работе [6] данная задача решена.

## **ВОЗМОЖНОСТЬ РАДИОМОНИТОРИНГА РАБОТЫ НС НААРР С ТЕРРИТОРИИ РФ ПРИ ПОМОЩИ ЭФФЕКТА РАКУРСНОГО РАССЕЙНИЯ**

Для определения требований к расположению на территории РФ комплексов мониторинга с использованием работы [6] проведено моделирование ракурсного рассеяния радиоволн на МИИН, создаваемых над НС НААРР.

На рис. 1 для рассеяния КВ радиоволн с частотой 15 МГц показаны контуры обратного рассеяния, обозначенные  $90^\circ$ , а также сопряженные контуры  $\pm 2^\circ$ , обозначенные соответственно  $88^\circ$  и  $92^\circ$ , для различных высот точки рассеяния. Контуры, образованные при рассеянии на высоте 230 км, показаны сплошной линией, при рассеянии на высоте 260 км – пунктирной линией. Из анализа рис. 1 видно, что при заданных условиях рассеяния, контуры обратного рассеяния и сопряженные ракурсные контуры проходят по территории полуострова Чукотка.

На рис. 2 представлены ракурсные контуры для других мод ЛЧМ сигнала: 10 и 20 МГц, а также для УКВ радиоволн. Из анализа рис. 2 видно, что применять УКВ диапазон для мониторинга не имеет смысла, так как контур обратного рассеяния не проходит по территории России, а сопряженный контур  $92^\circ$  вообще на земной поверхности отсутствует. Рассмотрев рис. 2, можно заметить, что при определенных условиях рассеяния ракурсные контуры для 10 и 20 МГц проходят по территории РФ.

Смоделированная на земной поверхности геометрия ракурсных контуров для случая вероятного функционирования НС НААРР позволяет сделать вывод о потенциальной возможности мониторинга работы американского стенда на определенных модах ЛЧМ сигнала в КВ диапазоне, при условии возникновения сопряженных контуров, проходящих по территории России.

Моделирование ракурсного рассеяния радиоволн с частотой 15 МГц показывает, что абсолютное время распространения по траектории обратного рассеяния для российской территории составляет  $\sim 12,5$  мс, угол прихода –  $\sim 12,7^\circ$  и азимут на НС НААРР –  $\sim 80^\circ$ . Данные параметры рассеянного сигнала позволяют определить положение ОР и ее характеристики.



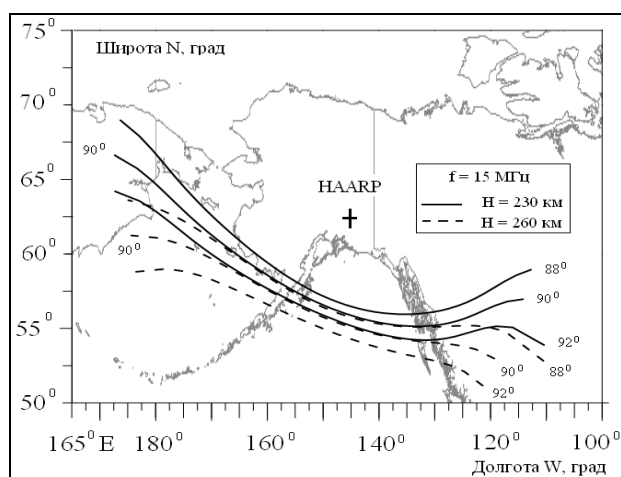


Рис.1. Ракурсные контуры, образованные при рассеянии КВ радиоволн с частотой 15 МГц на МИИН на высоте  $H_{\text{МИИН}}=230$  км ( $f_{\text{НС}}=5,325$  МГц) и  $H_{\text{МИИН}}=260$  км ( $f_{\text{НС}}=5,601$  МГц)

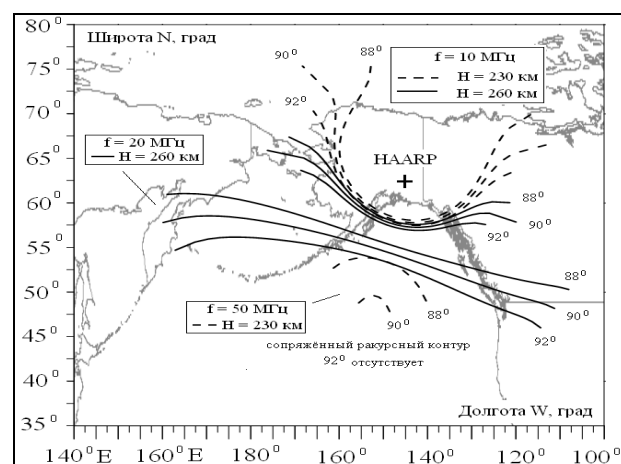


Рис.2. Ракурсные контуры, образованные при рассеянии радиоволн КВ и УКВ диапазона на МИИН на высоте  $H_{\text{МИИН}}=230$  км ( $f_{\text{НС}}=5,325$  МГц) и  $H_{\text{МИИН}}=260$  км ( $f_{\text{НС}}=5,601$  МГц)

Мощность КВ передатчиков для проведения мониторинга работы НС НААРП при помощи эффекта ракурсного рассеяния можно оценить из уравнения радиолокации [7]. При известной минимальной чувствительности радиоприемников комплексов контроля радиоизлучений можно рассчитать значение минимальной эффективной излучаемой мощности передатчика  $W_{1\text{min}}$ , которую можно зарегистрировать радиоприемником комплекса контроля. Существующие отечественные комплексы контроля радиоизлучений имеют чувствительность по электрической компоненте поля  $\sim 5$  мкВ/м [8].

На рис. 3 представлены результаты оценок минимальной эффективной излучаемой мощности радиопередатчика, который может быть обнаружен приемником с заданной чувствительностью на территории РФ. Расчеты проводились при частоте радиосигнала  $f = 15$  МГц, высоте расположения МИИН  $H = 230$  км для сечения ОР  $\Sigma \approx 100$  км<sup>2</sup>. Кривая 1 относится к случаю, когда приемник расположен на контуре обратного рассеяния (сплошная линия 90° на рис. 1) на Чукотке в точке с координатами 180° E; 64,88° N.

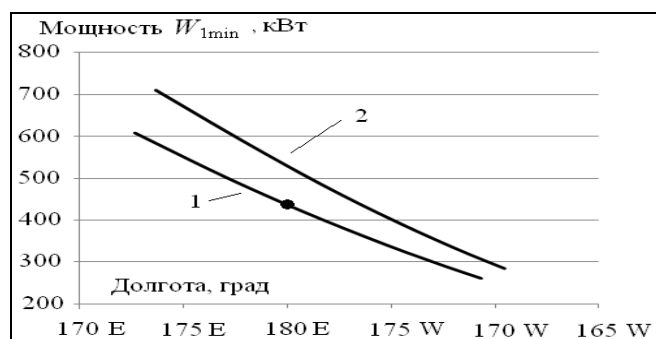


Рис.3. Зависимость эффективной излучаемой мощности передатчика от его положения на ракурсных контурах 90° и 88–92°

Из анализа графика на рис.3 становится понятным, что минимальная мощность передатчика комплекса контроля, находящегося на территории России, лежит в диапазоне 260–

600 кВт в зависимости от положения на контуре обратного рассеяния. Точка на кривой 1 соответствует совмещенному положению передатчика и приемника на контуре обратного рассеяния. В этом случае мощность передатчика должна быть  $\sim 4,4$  МВт. Кривая 2 относится к случаю расположения приемника на контуре  $92^\circ$  (см. рис. 1) на Чукотке (на побережье Анадырского залива) в точке  $180^\circ$  E;  $62,85^\circ$  N. В этом случае эффективная излучаемая мощность передатчика, расположенного на сопряженном ракурсном контуре  $88^\circ$ , должна быть  $\sim 300\div 700$  кВт.

При совмещенном расположении передатчика и приемника ЛЧМ, зондирующего излучения на контуре обратного рассеяния на полуострове Камчатка (сплошная линия  $90^\circ$  для частоты  $f = 20$  МГц на рис. 2), эффективная излучаемая мощность передатчика комплекса мониторинга должна быть более 18 МВт.

В случае мониторинга с полуострова Чукотка такая величина может быть значительно снижена. Это обусловлено меньшей протяженностью трассы распространения зондирующего радиосигнала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной статье проанализирована возможность использования эффекта ракурсного рассеяния зондирующих радиоволн для реализации с территории РФ мониторинга работы НС HAARP, функционирующего в режиме модификации верхней ионосферы. Выявлено, что мониторинг возможен только при использовании зондирующего радиоизлучения КВ диапазона, так как только в этом случае ракурсные контуры рассеяния проходят по российской территории.

Рассмотрены возможные места организации мониторинга на территории России. Установлено, что мониторинг с полуострова Чукотка будет иметь значительно меньшие требования по энергетике, чем мониторинг с полуострова Камчатка.

Практически задача мониторинга работы НС HAARP с использованием эффекта ракурсного рассеяния радиоволн может быть решена путем оснащения геофизических станций, а также станций специального контроля МО РФ на российской территории комплексами аппаратуры излучения и приема ЛЧМ радиоволн в КВ диапазоне.

## Список используемых источников

1. Гуревич А.В. // УФН. – 2007. – Т. 177, №11. – С. 1145.
2. Rao P.V. and Thome G.D. // Radio Science. – 1974. – Vol. 9, №11.
3. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. – М.: Советское радио, 1961.
4. Пат. № 2529355 РФ. / В.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.В. Вертоградова. – Опубл. 27.09.2014. – 14 с.
5. Распространение радиоволн. О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. Учебник для вузов. – М.: ЛЕНАНД. – 2009. – 496 с.
6. М.С. Болдырев, Н.Д. Наумов, В.А. Никольский, В.П. Урядов // Успехи прикладной физики. – [В печати].
7. Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 1984.
8. Оружие и технологии России: Энциклопедия XXI век: Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы. – М.: Оружие и технологии, 2006. – Т. 13.

А.А. Бычков;  
А.М. Петрунин;  
А.В. Частухин  
АНО «Агентство атмосферных технологий», г. Москва

## **МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С ЦЕЛЬЮ ИСКУССТВЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ**

Приводится описание разработанных в АНО «Агентство АТТЕХ» (г. Москва) технических и программных средств, позволяющих расширить сферу применения отечественных технологий активных воздействий на облака с целью искусственного увеличения осадков и снизить стоимость проведения таких работ за счет внедрения в практику современных мобильных технических систем.

Ключевые слова: активные воздействия на облака, искусственное увеличение осадков, малогабаритный метеорологический радиолокатор «КОНТУР-МЕТЕО-01», мобильный пункт управления.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы выросла потребность в проведении работ по активным воздействиям (АВ) на облака с целью искусственного увеличения осадков (ИУО) в интересах сельского хозяйства, характеризующихся относительно небольшими площадями проведения работ и требующих высокой мобильности технических средств. Однако существующая информационно-измерительная система (ИИС) не в полной мере способна обеспечить возможность проведения таких работ, что, в свою очередь, требует разработки новых технических средств [3].

Так, с целью повышения эффективности управления работами по АВ на облака за последние годы в сфере технического обеспечения в АНО «Агентство АТТЕХ» были разработаны современные средства, позволяющие создать мобильную систему АВ. Использование такой системы позволяет удовлетворить существующую потребность в оперативном проведении производственных работ по АВ с целью ИУО в интересах сельского хозяйства, для борьбы с лесными пожарами и т.д.

Основными элементами разработки мобильных технических средств обеспечения работ по АВ являются:

- создание наземного автоматизированного радиолокационного метеорологического комплекса с системой цифровой обработки и регистрации информации для метеорологического обеспечения работ по АВ;
- применение беспилотных пилотируемых летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных самолетными средствами воздействия;
- создание мобильного пункта управления.

### **РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

Для решения задач радиолокационного метеорологического обеспечения в рамках совершенствования существующей ИИС и создания мобильной системы АВ возможно использование созданного АНО «Агентство АТТЕХ» одноволнового (длина волны 3,2 см) мобильного метеорологического радиолокатора (ММРЛ) «Контур-Метео-01» (рис. 1) [1, 2, 4]. Основные технические характеристики ММРЛ «Контур-Метео-01» приводятся в работе [2].

ММРЛ «Контур-Метео-01» обеспечивает:

- обнаружение и отображение метеоинформации о полях облачности и осадков, определение их характеристик:
  - радиолокационной отражаемости;

- верхней границы облачности;
- интенсивности осадков;
- профиля радиолокационной отражаемости;
- опасных метеоявлений погоды (облачность, осадки, ливень, гроза, град);
- скорости переноса зон радиоэха;
- архивирование метеорологической информации;
- контроль функционирования радиолокатора.



Рис. 1. Общий вид ММРЛ «Контур-Метео-01»

Результаты опытной эксплуатации ММРЛ «Контур-Метео-01» и проведенный сравнительный анализ радиолокационной метеорологической информации, полученной ММРЛ «Контур-Метео-01», и данных из других источников позволяют сделать следующие выводы [2]:

- опытная эксплуатация подтвердила высокую надежность работы ММРЛ в автоматическом режиме;
- ММРЛ позволяет надежно обнаруживать зоны конвективной облачности на расстоянии до 150–200 км и слоистой облачности – до 100–120 км;
- ММРЛ может быть использован для получения радиолокационной метеорологической информации при проведении работ по АВ на облака с целью искусственного регулирования осадков в составе как стационарных, так и мобильных пунктов управления активными воздействиями на облака.

### **САМОЛЕТНЫЕ СРЕДСТВА ДОСТАВКИ РЕАГЕНТА И ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ**

В настоящее время в работах по АВ на облака используются самолеты государственной авиации типа Ил-18, Ан-12, Ан-26, Ан-30, Ан-32, Ан-72, Ан-28, М-101Т «Гжель», Су-30, оборудованные на время проведения работ метеорологической аппаратурой и комплексами технических средств для проведения активных воздействий на облака [4, 5]. Однако использование таких типов самолетов требует наличия громоздкой инфраструктуры вблизи района работ, что ограничивает сферу применения технологий АВ, а также приводит к значительному повышению стоимости таких работ. Таким образом, одним из приоритетных направлений в сфере совершенствования самолетных средств доставки реагента является внедрение в практику АВ беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Использование БПЛА для активных воздействий на облака накладывает на них определенные требования [3]:

- возможность длительного нахождения БПЛА в условиях высокой влажности и низких температур при проведении работ в облаках, а также в подоблачном слое;

- устойчивость БПЛА к условиям высокой турбулентности;
- наличие на борту БПЛА антиобледенительной системы;
- возможность размещения на борту средств активного воздействия общим весом до 30 кг;
- диапазон высот работы БПЛА должен составлять от 200 до 6000 м;
- продолжительность эффективного этапа полета должна составлять не менее 3,5 ч;
- дальность (радиус) действия – до 350 км.

Анализ производимых в Российской Федерации беспилотных систем позволяет сделать вывод, что из целого ряда имеющихся БПЛА можно выделить несколько, способных выполнять роль носителей средств измерения характеристик атмосферы и воздействия на облака и туманы при проведении работ по АВ: Нарт («Антиград-Авиа»), Типчак (ОАО «Концерн «Вега»), Иркут-200 (НПК «Иркут»), Форпост (ОАО «Уральский завод гражданской авиации»), Zala-421-20 (Группа компаний ZALA AERO) [3].

Результаты численного моделирования переноса полей реагента в условиях свободной атмосферы, полученные с использованием специально разработанной в АНО «Агентство АТТЕХ» трехмерной нестационарной численной модели SeedDisp, позволяют сделать вывод, что эффективность выполнения работ с применением БПЛА не уступает, а по некоторым показателям и превосходит эффективность работ с использованием самолетов. Основным показателем выполнения работ с использованием БПЛА является возможность значительного повышения экономической эффективности [3].

### МОБИЛЬНЫЙ ПУНКТ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТАМИ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

С целью повышения эффективности управления работами по АВ на облака, а также оперативности управления и контроля при проведении таких работ в любой географической точке Земли в АНО «Агентство АТТЕХ» создан мобильный пункт управления работами по АВ на облака (МПУ АВ) (рис. 2), включающий:

- оперативный пункт управления работами по АВ на облака на базе автомобиля УАЗ 3909 (ОП МПУ АВ);
- программно-аппаратный комплекс МПУ АВ;
- комплекс системы автономного энергоснабжения;
- комплекс вспомогательных средств технического обеспечения;
- оперативный пункт управления, представляющий собой рабочие места для операторов в салоне автомобиля УАЗ 3909 (рис. 2), коммутационно связанные с ММРЛ и программно-аппаратным комплексом (ПАК МПУ).



а)



б)

Рис. 2. Общий вид МПУ АВ (а) на базе автомобиля УАЗ 3909, оперативный пункт управления (б) в кабине автомобиля УАЗ 3909

Организация связи в созданной мобильной системе АВ соответствует современным требованиям технологий АВ, она построена с использованием технических средств связи, при-

меняющих различные каналы передачи данных (GSM, HTTP, FTP, радио), и позволяет задействовать данную систему как самостоятельно, так и совместно с существующей ИИС. Созданная мобильная система АВ позволяет решать задачи применения современных методов и технологий АВ с целью ИУО в интересах сельского хозяйства, в борьбе с лесными пожарами и т.д.

Результаты проведенной в 2011–2013 годах опытной эксплуатации мобильного пункта управления работами по АВ показали надежность работы созданного комплекса и перспективность его применения в оперативных работах по активным воздействиям на облака.

### Список используемых источников

1. Мобильный пункт управления авиационными работами по активному воздействию на облака (МПУ АВ) / Д.В. Амурский, В.П. Корнеев, Б.П. Колосков и др. // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24-28 октября 2011 г. – Нальчик: ООО «Печатный двор», 2011. – С. 367–371.

2. Использование мобильного метеорологического радиолокатора «КОНТУР-МЕТЕО-01» в работах по АВ на облака / А.А. Бычков, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев и др. // Доклады международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь: СКФУ, 2013. – С. 365, 313–316.

3. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на облака и туманы / А.А. Бычков, В.П. Корнеев, Б.П. Колосков, А.В. Частухин, А.М. Петрунин // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. – Нальчик, 7–9 октября 2014 г.

4. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 341 с.

5. Корнеев В.П., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Современное состояние и перспективы применения авиационной технологии активного воздействия на облака для метеозащиты от аномальных явлений погоды и последствий техногенных катастроф // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 109–121.

В.Ф. Григорьев;  
А.Е. Сидоренко;  
Е.Д. Терещенко,  
*доктор физико-математических наук*  
ФГБУН «Полярный геофизический институт», г. Мурманск

## **ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 ГОДА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫХ РАДИОВОЛН С ЧАСТОТОЙ 82 ГЦ НА ВЫСОКОШИРОТНОЙ ТРАССЕ**

Наблюдалось распространение искусственных сверхнизкочастотных (СНЧ) радиоволн в волноводе Земля-ионосфера во время солнечного затмения на высокоширотной трассе Кольский полуостров – архипелаг Шпицберген протяженностью 1200 км. Обнаружена вариация амплитуды магнитного поля, связанная с реакцией нижней ионосферы на резкое уменьшение солнечной освещенности. Эффект влияния солнечного затмения на распространение искусственных СНЧ волн в приземном волноводе наблюдался впервые.

Ключевые слова: солнечное затмение, распространение СНЧ радиоволн, нижняя ионосфера, приземный волновод.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Благодаря своему заметному комплексному воздействию на ионосферу и атмосферу Земли солнечное затмение вызывает постоянный интерес исследователей в области геофизики, радиофизики и др. Исследования возникающих эффектов регулярно проводятся во время солнечных затмений уже более 60 лет, и значительная часть из них посвящена различным радиофизическим аспектам этого явления и представлена в многочисленной литературе.

В дневных условиях *D*-слой ионосферы является областью, где происходит отражение СНЧ радиоволн. Наблюдения условий распространения этих радиоволн во время солнечного затмения дают непосредственную информацию о реакции нижней ионосферы.

Основные последствия резкого кратковременного уменьшения солнечного излучения в нижней ионосфере (слой *D* и нижняя часть *E*-слоя) во время затмения связаны с падением скорости ионизации. При этом *D*-слой ионосферы подвергается значительной модификации [1, 2], и в результате в нижней ионосфере создаются условия, приближающиеся к ночным. В отличие от смены дня и ночи, затенение ионосферы при солнечном затмении имеет характерные особенности. Во-первых, это геометрические особенности, поскольку Луна, как правило, перекрывает Солнце, которое уже полностью вошло над горизонтом. Во-вторых, область тени во время затмения в отличие от области, ограниченной солнечным терминатором, достаточно локальна, а само явление быстротечно. Кроме того, при перемещении тени вдоль ионосферы со сверхзвуковой скоростью в ней возникают волновые гидродинамические возмущения, что подтверждают наблюдения гравитационных волн в ионосфере во время затмения [3–5].

### **ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Во время солнечного затмения 20 марта 2015 г. северо-запад европейской части России находился в области частичного затмения (в обсерватории Ловозеро – до 87% в 10.18 UT), а архипелаг Шпицберген – в области полного затмения (10.10–10.12 UT). Вся трасса распространения радиоволн Кольский полуостров – архипелаг Шпицберген целиком находилась в области тени примерно с 9.10 до 11.25 UT.

Источник СНЧ излучения располагался в северной части Кольского полуострова и представлял собой горизонтальный заземленный электрический диполь, ориентированный вдоль географической широты [6, 7]. Во время наблюдений генерировался СНЧ сигнал на частоте

82 Гц при постоянной амплитуде тока в антенне, относительные вариации силы тока не превышали 0,5%.

Прием излучаемого сигнала производился в обсерватории Баренцбург (арх. Шпицберген) и в относительно близкой к источнику точке – в обсерватории Ловозеро (Кольский п-ов) (рис. 1). При этом измерения в обсерватории Ловозеро предназначались для контроля условий возбуждения поля, поскольку в этой зоне СНЧ поле практически не испытывает влияния ионосферы.

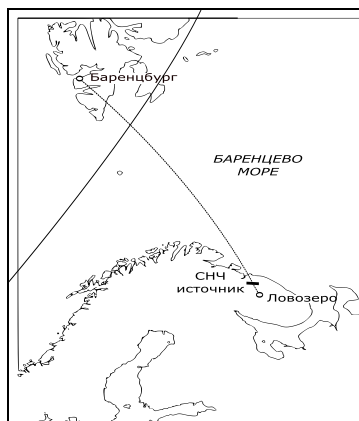


Рис.1. Геометрическая схема эксперимента

Для измерений использовались 3-компонентные индукционные магнитометры с цифровой регистрацией сигнала, имеющего частоту дискретизации 512Гц, горизонтальные датчики которых ориентировались по стрелке магнитной буссоли на север ( $H$ -компонента) и на запад ( $D$ -компонента).

Измерения квазимонохроматического СНЧ сигнала на частоте 82 Гц выполнялись в период 19–21 марта 2015 г., чтобы помимо наблюдения эффекта солнечного затмения иметь возможность сопоставления результатов с двумя контрольными случаями. Для анализа полученных данных были выбраны промежутки времени 9–12 UT.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 показаны результаты измерений амплитуды  $H$ -компоненты магнитного поля во время солнечного затмения с 9 до 12 UT 20 марта 2015 г. Значения на графиках даны для силы тока 1 А в антенне источника и обозначены кружками, пунктирная кривая – результат сглаживания экспериментальных точек.

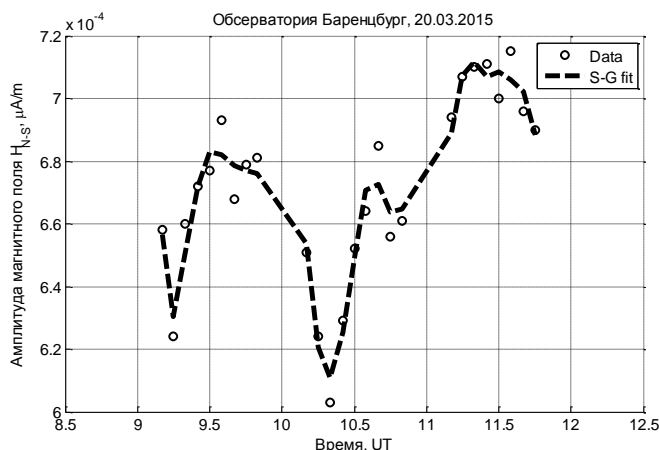


Рис.2. Вариации амплитуды магнитного поля в обсерватории Баренцбург



Видно, что наблюдаемая в удаленной точке амплитуда поля испытывает вариацию, по времени совпадающую с прохождением солнечного затмения в области измерений. Устойчивое убывание амплитуды начинается в 9.30 UT, затем в промежутке 10.15–10.40 достигается минимум, и начинается возрастание – примерно до 11.20 UT. Также обращает на себя внимание немонокотное поведение поля в промежутке 9.00–9.30, соответствующем начальной фазе затмения.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значительное уменьшение потока солнечного излучения во время затмения меняет концентрацию электронов в ионосферном слое  $D$  и нижней части слоя  $E$ , определяющих свойства волновода Земля-ионосфера в СНЧ диапазоне. Очевидно, что условия распространения радиоволн при солнечном затмении лишь в определенной степени приближаются к ночным. При этом особенностью эффекта в полярной ионосфере является дополнительный корпускулярный фактор – ионизация высокоэнергичными частицами.

Несмотря на то, что адекватное описание изменений структуры  $D$ -слоя ионосферы во время солнечного затмения достаточно сложно, качественно можно заключить, что резкое падение концентрации заряженных частиц вследствие уменьшения солнечной освещенности увеличивает действующую высоту отражающего ионосферного слоя, что наблюдалось, например, в исследованиях шумановского резонанса при смене дня и ночи [8].

Для физического объяснения наблюдаемого поведения поля рассмотрим волноводные формулы из работ [9, 10]. Опуская в выражениях для компонент поля множители, не меняющиеся во время измерений, получим

$$|H_{\phi}| \propto \frac{\sqrt{v_{ph}}}{h} \exp(-\alpha\rho); |H_{\rho}| \propto \frac{(v_{ph})^{3/2}}{h} \exp(-\alpha\rho), \quad (1)$$

где  $v_{ph}$  – фазовая скорость волны в волноводе Земля-ионосфера;

$h$  – высота волновода;

$\alpha$  – коэффициент затухания с расстоянием  $\rho$ .

Видно, что амплитуда поля во время затмения уменьшается главным образом вследствие возрастания эффективной высоты отражения в волноводе. На рис. 2 видно, что наибольшее уменьшение амплитуды поля относительно начальной величины (на 9.30 UT) в Баренцбурге составило примерно 13%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены предварительные результаты первых наблюдений влияния солнечного затмения на нижнюю ионосферу и на условия распространения радиоволн в приземном волноводе, полученные с использованием контролируемого источника СНЧ диапазона в высоких широтах.

Измерения при практически полном затенении трассы распространения радиоволн протяженностью 1200 км показали, что амплитуда поля в точке приема при максимуме затмения практически синхронно с перекрытием Солнца Луной уменьшилась на 10–12% относительно начальной величины.

По имеющимся результатам исследований, проведенных ранее в СДВ диапазоне, основной эффект затмения в нижней ионосфере заключается в увеличении эффективной высоты отражения электромагнитных волн в  $D$ -области. Результаты измерений в проведенном эксперименте подтверждают это и для СНЧ диапазона. В дальнейшем целесообразно более детально рассмотреть изменение профиля электронной концентрации в нижней ионосфере и связанные с ним динамические процессы.

Полученные результаты отражают чувствительность радиоволн СНЧ диапазона, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера, к состоянию ионосферы, показывают потенциальные преимущества использования контролируемых СНЧ источников для мониторинга состояния нижней ионосферы и демонстрируют устойчивость параметров СНЧ сигналов к значительным возмущениям ионосферы, что является положительным фактором с точки зрения коммуникационных задач.

#### Список используемых источников

1. *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика: в 2 ч. – М.: Мир, 1974. – Ч.1. – 384 с.
2. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы – М.: Наука, 1988. – 528 с.
3. *Koucká Knížová P. and Mořna Z.* Acoustic–Gravity Waves in the Ionosphere During Solar Eclipse Events // Acoustic Waves – From Microdevices to Helioseismology, Prof. Marco G. Beghi (Ed.), InTech. – 2011.
4. Wavelet characterization of ionospheric acoustic and gravity waves occurring during the solar eclipse of August 11, 1999. / P. Šauli, P. Abry, J. Bořka, L. Duchayne // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – №68 (3–5). – 2011. – P.586–598.
5. Low-mid latitude D region ionospheric perturbations associated with 22 July 2009 total solar eclipse: Wave-like signatures inferred from VLF observations/A.Maurya, D. Phanikumar, R. Singh, S. Kumar, B. Veenadhari, Y.-S. Kwak, A. Kumar, A. Singh, and K. Niranjana Kumar // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2014. – №119. – P. 8512–8523.
6. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ диапазона / Е.П. Велихов, А.А. Жамалетдинов, Л.А. Собчаков и др. // Доклады Академии наук. – 1994. – Т. 338, №1. – С. 106–109.
7. *Баикуев Ю.Б., Хантанов В.Б., Ханхараев А.В.* Анализ условий распространения СНЧ радиоволн на трассе “Зевс” – Забайкалье // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т.XLVI, №12. – С.1017–1026.
8. *Williams E., Satori G.* Solar radiation-induced changes in ionospheric height and the Schumann resonance waveguide on different timescales // Radio Sci., 42, RS2S11. – 2007.
9. *Bannister P.* Simplified formulas for ELF propagation at shorter distances // Radio Sci. – Vol. 21, May-June. – 1986. – P. 529–537.
10. Long-range communications at extremely low frequencies / S. Bernstein, M. Burrows, J. Evans, et al. // Proceedings of the IEEE. – 1974. – №64, 3. – P. 292–312.

Ю.Ю. Куликов\*,

доктор физико-математических наук;

В.Л. Фролов\*\*,

доктор физико-математических наук

\* ИПФ РАН, г. Нижний Новгород.

\*\* ФГБНУ НИРФИ, г. Нижний Новгород.

## НАБЛЮДЕНИЯ ОТКЛИКА НА МОДИФИКАЦИЮ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ СУРА В ВАРИАЦИЯХ МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА

Представлены результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы во время модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами. Эксперименты проводились с 2008 по 2015 г. на среднеширотном стенде СУРА. Обнаружено уменьшение на  $\sim 10\%$  интенсивности микроволнового излучения мезосферы в линии озона (рабочая частота 110836,04 МГц) во время воздействия на ионосферу радиоволнами с эффективной мощностью  $\sim 100$  МВт.

Ключевые слова: озон, мезосфера, модификация ионосферы мощными радиоволнами.

### ВВЕДЕНИЕ

Мезосфера Земли, расположенная на высотах 50–90 км, до сих пор остается наименее исследованной частью средней атмосферы. Ее ионизация достаточно слаба и существует только в дневное время суток. Ионизация определяется космическими лучами галактического и солнечного происхождения, наиболее энергичной частью солнечного рентгеновского спектра, излучением интенсивной солнечной линии Лайман- $\alpha$  и др., при этом источники ионизации эффективно проявляют себя на разных высотах атмосферы. Отличительным свойством этой области является большая плотность нейтральных частиц, которая всегда на порядок выше плотности ионов и электронов (менее  $10^3$  см $^{-3}$ ). Плазма состоит из положительных и отрицательных ионов и ионов-связок, которые возникают в результате ионизационных, обменных и рекомбинационных процессов [1]. Наличие отрицательных ионов является одной из важных особенностей  $D$ -области по сравнению с другими ионосферными областями. Специфика поведения  $D$ -области по сравнению с другими ионосферными областями состоит в том, что электронная концентрация в ней крайне изменчива, даже в спокойных и неизменных гелиогеофизических условиях [2]. При оценке возможного влияния малых составляющих ат-мосферы на рекомбинационные процессы в области  $D$  ионосферы неоднократно указывалось на озон как на фактор, способствующий образованию стабильных отрицательных ионов [2, 3]. При существующей сложности физических процессов количество возможных методов исследования мезосферы ограничено. На высотах 50–90 км практически отсутствуют контактные измерения, что сильно усложняет понимание физических процессов формирования и эволюции мезосферы. Одной из важнейших проблем средней атмосферы является взаимодействие нижней ионосферы с озоновым слоем Земли на высотах мезосферы.

В ряде работ оценены вариации мезосферного озона во время протонных событий 28 октября 2003 г. [4], полного солнечного затмения 29 марта 2006 г. [5] и связь между естественными изменениями полного электронного содержания в ионосфере и содержанием мезосферного озона в области высот 57–79 км [6]. Кроме того, по результатам ракетных измерений электронной концентрации в  $D$ -области на станции Волгоград и сопоставления их с данными одновременных измерений озона с ИСЗ SME найдена значимая корреляция между этими параметрами на высотах 52–60 км днем и 80 км ночью [7]. Помимо изучения естественных факторов, влияющих на состояние мезосферы, в последние десятилетия развивались методы искусственного воздействия на нее с помощью мощного КВ радиоизлучения, генерируемого специально построенными нагревными стендами. Это позволяет выполнять

исследования, когда измерения проводятся с повторяемыми и контролируемыми свойствами создаваемых возмущений. Настоящая работа обобщает результаты экспериментов по модификации ионосферы, которые проводились в 2008–2015 гг. на среднеширотном нагревном стенде СУРА (ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород), расположенном около р/п Васильсурск на расстоянии 120 км к востоку от Нижнего Новгорода. Целью экспериментов было определение степени возмущения мощными КВ радиоволнами нейтральной компоненты (озона) в нижней ионосфере на высотах 50–90 км. Для наблюдений за поведением озона был использован метод наземной микроволновой радиометрии, который является, по сути, единственным методом для непрерывного контроля мезосферного озона с высоким временным разрешением (15 мин). Используемая в экспериментах микроволновая аппаратура и методика измерений описаны в работах [8, 9].

### ВАРИАЦИИ ОЗОНА, ВЫЗВАННЫЕ МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА

Микроволновый озонметр с 14 по 19 марта 2009 г. был включен в режиме непрерывного измерения интенсивности теплового излучения средней атмосферы в окрестности линии озона на частоте 110836,04 МГц. Помимо искусственных вариаций, вызванных нагревом нижней ионосферы мощными КВ радиоволнами, в круглосуточных измерениях были также измерены естественные фоновые вариации излучения стратомезосферного озона. К наиболее известным естественным вариациям озона относятся его суточные изменения в мезосфере, связанные с восходом и заходом Солнца [10]. При этом антенна микроволнового озонметра была ориентирована в направлении излучения радиоволн стендом СУРА под углом  $12^\circ$  от зенита на «юг». На ионосферу воздействовала мощная радиоволна  $X$ -поляризации на частоте 4,3 МГц с эффективной мощностью около 80 МВт. Работа стенда осуществлялась в режиме: 30 мин – излучение, 30 мин – пауза. Такой режим был выбран исходя из возможностей микроволнового озонметра, когда за время нагрева и паузы можно было измерить с временным разрешением 15 мин два спектра атмосферной линии озона. В результате выполненных измерений было обнаружено уменьшение во время нагрева интенсивности теплового излучения атмосферы в линии озона на частоте 110,83604 ГГц в среднем на 10% по всем выполненным сеансам измерений в марте 2009 г.

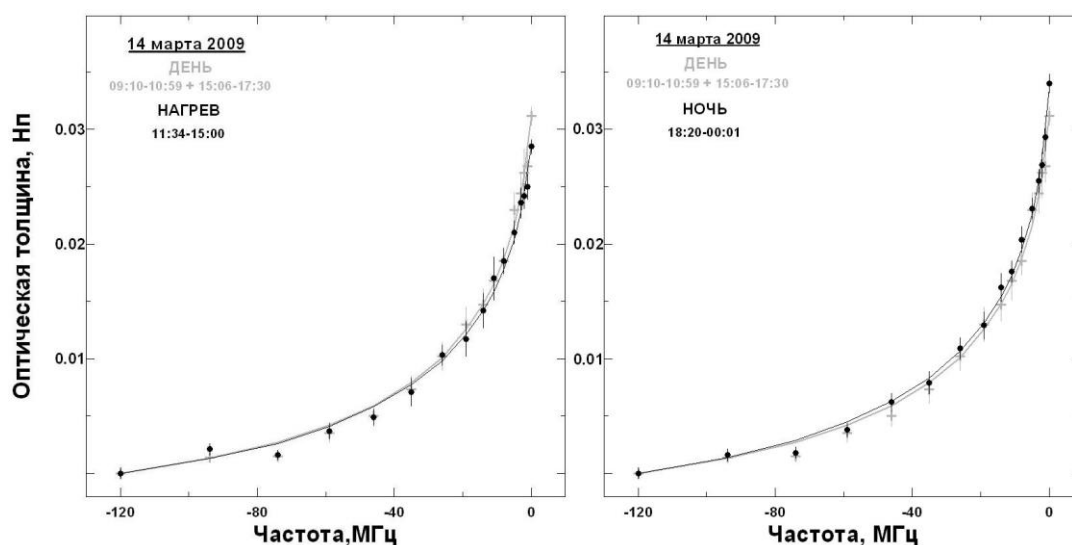


Рис. 1. Изменения спектра атмосферной линии озона при воздействии мощного КВ радиоизлучения на нижнюю ионосферу (левая панель); суточные изменения спектра озона, которые связаны с восходом и заходом Солнца (правая панель)

На рис. 1 представлены измеренные 14 марта спектры озона, когда был осуществлен наиболее продолжительный по времени сеанс нагрева нижней ионосферы в спокойных геомагнитных условиях. Хорошо видно, что нагрев ионосферы приводит к заметному понижению интенсивности излучения в линии озона на отстройке менее 40 МГц относительно резонансной частоты – и тем в большей степени, чем меньше величина отстройки.

Эксперимент 27–28 марта 2011 г. был поставлен следующим образом. Стенд СУРА излучал радиоволны Х-поляризации на частоте 4,3 МГц под углом  $12^\circ$  от зенита на юг. Нагрев нижней ионосферы проводился 27 марта 2011 г. с 12:02 до 14:32 московского времени (мск) и 28 марта с 12:00 до 15:30 мск в режиме: 30 мин – излучение, 30 мин – пауза. Прием теплового излучения средней атмосферы на частоте 110836,04 МГц осуществлялся при помощи двух идентичных мобильных микроволновых озонметров. Диаграмма направленности антенны одного из озонметров была ориентирована в направлении излучения антенны стенда СУРА. Диаграмма второго озонметра была направлена под зенитным углом  $70^\circ$  на юг. Основным результатом этого эксперимента было обнаружение вариаций озона не только в модифицированной области мезосферы в направлении излучения антенны стенда, но и на расстоянии 150 км к югу при наклонном ( $20^\circ$  над горизонтом) микроволновом зондировании [11].

На рис. 2 показаны вариации концентрации мезосферного озона (высота 60 км) во время кампании по нагреву 30.09–01.10 2015 г. на стенде СУРА. Нагрев ионосферы осуществлялся мощной радиоволной Х-поляризации на частоте 4,785 МГц в направлении  $12^\circ$  от зенита на «юг». Эффективная мощность излучения составляла около 100 МВт. Нагрев выполнялся 30.09.2015 с 18:01 до 20:30 в режиме: 14 мин – излучение, 16 мин – пауза. Жирной сплошной линией выделено время работы нагревного стенда СУРА. Полыми и «заполненными» кружками показаны дневные и ночные концентрации озона на высоте 60 км.

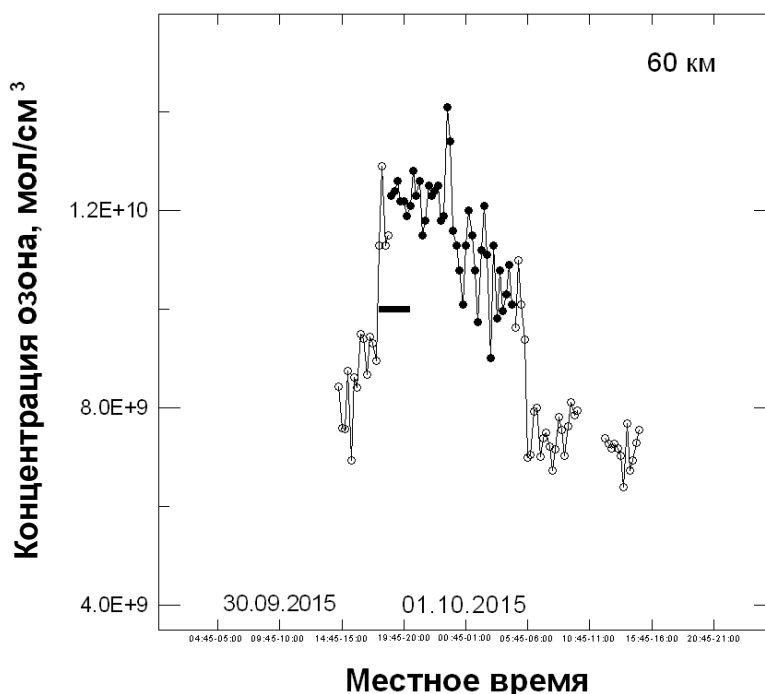


Рис. 2. Временные вариации концентрации мезосферного озона из наблюдений под зенитным углом  $70^\circ$ , в том числе при нагреве ионосферы

В эксперименте были обнаружены суточные вариации мезосферного озона, а также вариации, которые, по-видимому, связаны с возбуждением терминаторной волны при заходе Солнца. Сеанс нагрева как раз совпал с этим периодом времени. Таким образом, динамиче-

ские процессы могут оказать существенное влияние на количественную оценку взаимосвязи мезосферного озона и заряженной компоненты нижней ионосферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате ряда экспериментов по нагреву ионосферы мощным КВ радиоизлучением обнаружено физическое явление – уменьшение интенсивности микроволнового излучения мезосферы в линии озона. Показано, что этот эффект наблюдался не только непосредственно в модифицированной области мезосферы, но и на расстоянии 150–170 км от нее. Для объяснения природы явления гипотетически нужно, по-видимому, использовать модель нижней ионосферы с учетом фотохимии отрицательных ионов. Было установлено, что изменение мезосферных озона и температуры в *D*-области определяются не только изменением солнечной или геомагнитной обстановки, но также изменением характеристик мезосферы, ее термобарического и динамического режимов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-04229 и гранта РНФ № 14-12-00556.*

## Список используемых источников

1. *Brasseur G., Solomon S.* Aeronomy of the middle atmosphere // Reidel publishing company. – 1984.
2. *Данилов А.Д., Власов М.Н.* Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1973.
3. *Reid G.C., Bates D.R., Bederson B.* Ion chemistry in the D-region // *Adv. Atomic Molecular Phys / Academic.* Orlando. Fla. – 1976. – Vol.12.
4. Observations of mesospheric ozone depletion during the October 28, 2003 solar proton event by OSIRIS / *D.A. Degenstein, N.D. Lloyd, A.E. Bourassa et al.* // *Geophysical Research Letters.* – 2005. – Vol. 32.
5. Вариации концентрации мезосферного озона во время полного солнечного затмения 29 марта 2006 года по данным микроволновой радиометрии / *Ю.Ю. Куликов, А.А. Красильников, В.М. Дёмкин, В.Г. Рыскин* // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 522–526.
6. On the potential impact of large electron concentrations on mesospheric ozone / *G. Muscari, M. Pezzopane, V. Romaniello, R.L. de Zafra et al.* // *Mem. S. A. It.* – 2005. – Vol. 76. – P. 1007–1010.
7. *Пахомов С.В., Князев А.К.* Озон в мезосфере и электронная концентрация среднеширотной области *D* // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 1988. – Т. 28, № 6. – С. 976–979.
8. Обнаружение «озоновых облаков» в верхней стратосфере Земли методом миллиметровой радиометрии / *А.А. Красильников, Ю.Ю. Куликов, А.Б. Мазур и др.* // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 1997. – Т. 37, № 3. – С. 174–183.
9. *Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Shchitov A.M.* New mobile ground-based microwave instrument for research of stratospheric ozone (some results of observation) // *The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'07) Proceedings, Kharkov, Ukraine, June 25 – 30.* – 2007. – Vol. 1. – P. 62–66.
10. Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением / *Ю.Ю. Куликов, В.Л. Фролов, Г.И. Григорьев и др.* // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 2013. – Т. 53, № 1. – С. 102–109.
11. Вариации микроволнового излучения мезосферы при нагреве нижней ионосферы мощными КВ радиоволнами / *Ю.Ю. Куликов, Г.И. Григорьев, А.А. Красильников, В.Л. Фролов* // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2012. – Т. 55, № 12. – С. 57–65.

Н.В. Лебедев;  
В.В. Руденко,  
*кандидат физико-математических наук, доцент*  
ФГКУ «12 ЦНИИ», г. Сергиев Посад

## **ПРИМЕНЕНИЕ НАГРЕВНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ**

Получена оценка возможности уменьшения интенсивности потока высокоэнергичных частиц в искусственных радиационных поясах при помощи низкочастотного излучения, инициированного работой нагревного стенда, для защиты космических аппаратов.

Ключевые слова: радиационный пояс, КВ нагрев, магнитосфера, плазмосфера, поток частиц, пичч-угол.

Как известно, эксплуатация искусственных спутников Земли (ИСЗ), как военного, так и гражданского назначения, связана со значительными потенциальными рисками, которые в основном определяются радиационным воздействием на них потоков заряженных частиц. Главными негативными факторами, определяющими ресурс работы спутников, являются: деградация солнечных батарей, электризация поверхности, образование объемных зарядов внутри спутника и сбои в работе электронных схем. Для ИСЗ внутри магнитосферы самым значительным по радиационным воздействиям и, главное, постоянно действующим фактором является наличие частиц искусственных или естественных радиационных поясов (РП). В основном это потоки протонов и электронов. Другие факторы, такие, как радиационные воздействия от солнечных вспышек, могут быть более значительными, однако из-за кратковременности воздействия их вклад в полную годовую дозу не превышает 10% [1].

Радиационные пояса Земли могут быть естественного и искусственного происхождения. Основным источником частиц высоких энергий во внутреннем и внешнем естественных РП является распад нейтронов, которые образуются при взаимодействии космических лучей с плотными слоями атмосферы. Энергия захваченных в РП частиц характеризуется значением параметра  $L$ , определяемого отношением расстояния оболочки геомагнитного поля на экваторе к радиусу Земли. На оболочках с меньшими значениями  $L$  находятся частицы, обладающие большими энергиями. Структура и состав радиационных поясов подробно рассмотрены в [2].

Инжекция заряженных частиц в магнитосферу приводит к созданию искусственного РП (ИРП). Один из способов такой инъекции – высотный ядерный взрыв, при котором в магнитосферу Земли попадают электроны распада осколков деления. Заряженные частицы, захваченные геомагнитным полем Земли, и создают ИРП. Эксперименты по созданию ИРП проводились в СССР и США. Проведенные в США взрывы известны под названиями проектов «Аргус» (1958) и «Старфиш» (1962). В первом проекте частицы инжектировались при  $L$ , равном 1,7; 2,1 и 2,3 земного радиуса, а взрывы имели мощность, эквивалентную килотонному взрыву тринитротолуола. Толщина каждой оболочки «Аргус», измеренная по половине интенсивности перпендикулярно к границе, составляла ~90 км для двух первых взрывов и ~150 км для третьего. ИРП сохранялись несколько недель. Эквивалент взрыва проекта «Старфиш» составлял 1,4 Мт тринитротолуола и проводился на высоте 400 км. По экспериментальным оценкам  $\beta$ -распад продуктов деления взрыва дал  $\sim 10^{27}$  электронов с энергиями до 7 МэВ. Время существования в ИРП потоков заряженных частиц с плотностью потока, представляющей угрозу ИСЗ, составило несколько лет.

Сопоставление траекторий ИСЗ и областей расположения РП показало, что существующая на данный момент группировка спутников военного и двойного назначения, включающая в себя около сорока спутников связи, разведки, навигации, обнаружения стартов и юстировки РТС, имеет пересекающие области существования естественных или возможных ис-

кусственных РП орбиты. Таким образом, ИСЗ могут быть подвержены воздействию частиц высоких энергий. Одним из способов защиты ИСЗ могут быть методы активного воздействия на частицы радиационных поясов, приводящие к их выпадению в плотных слоях атмосферы. Механизм, обеспечивающий такое воздействие, постоянно действует в природе в виде ОНЧ источника излучения за счет грозовой активности. Искусственный ОНЧ источник можно создать и расположить на ИСЗ, на поверхности Земли либо в ионосфере путем воздействия на нее излучения радионагревного стенда (РНС).

Помимо этого РНС позволяет создавать неоднородности концентрации заряженных частиц, вытянутые вдоль силовых линий геомагнитного поля (дакты), которые могут выступать в качестве волновода для излучения ОНЧ источника и передачи энергии в РП. Данные экспериментов по созданию дактов плотности и их характеристики приведены в работе [3]. Таким образом, в данной статье рассматривается возможность применения РНС для очистки РП от заряженных частиц.

Для решения указанной задачи был разработан научно-методический аппарат, включающий в себя модель образования ионосферного источника излучения [4], модель распространения ОНЧ излучения от ионосферного источника в ионосфере и магнитосфере Земли [5] и модель взаимодействия ОНЧ излучения с заряженными частицами ИРП.

Расчет характеристик излучения от ОНЧ ионосферного источника в нижних слоях ионосферы (до 200 км) основан на решении волнового уравнения для компонент электрического поля, непосредственно вытекающего из системы уравнений Максвелла. Нижняя ионосфера рассматривалась как магнитоактивная плоскостроистая среда с экспоненциальными зависимостями компонент тензора диэлектрической проницаемости от высоты по аналогии с подходами [6]. Для решения волнового уравнения применялось преобразование Фурье по координатам, параллельным земной поверхности. Ряд упрощений, учитывающих соотношение между компонентами тензора  $\epsilon$ , позволил решить задачу и представить результат сначала в интегральном виде, а затем в виде суммы вычетов в особых точках. Выше 200 км поглощение ОНЧ излучения незначительно, что позволяет получить решение уравнений Максвелла в ВКБ приближении с использованием аппарата геометрической оптики [4].

Распространяясь по магнитосфере, ОНЧ излучение взаимодействует с заряженными частицами РП, изменяя их характеристики. Когда траектория полета частицы достигает нижних слоев ионосферы, она быстро теряет скорость. Условие высыпания частицы из РП может быть сформулировано в виде требования, задаваемого к углу между направлением вектора ее скорости и касательной к линии геомагнитного поля на экваторе (так называемый экваториальный питч-угол), который должен быть меньше некоторого (зависящего от высоты расположения пояса) угла, называемого границей конуса потерь:

$$\alpha_{lc} = \arcsin \left( \sqrt{\xi_m^3 / \sqrt{1 + 3(1 - \xi_m)}} \right); \quad \xi_m = \frac{R_E + h_m}{LR_E}, \quad R_E = 6370 \text{ км.}$$

Изменение экваториального питч-угла частицы происходит наиболее эффективно при возникновении резонанса, т.е. при выполнении в некоторой точке траектории условия  $\omega_r = m\omega_H / \gamma - \omega - k_z v_z = 0$ , где  $m$  – порядок резонанса. Электромагнитное поле волны задано в виде:

$$\begin{aligned} \vec{E}^\omega &= -\hat{x}E_x^\omega \sin \Phi + \hat{y}E_z^\omega \cos \Phi - \hat{z}E_z^\omega \sin \Phi; \\ \vec{B}^\omega &= -\hat{x}B_x^\omega \cos \Phi + \hat{y}B_z^\omega \sin \Phi - \hat{z}B_z^\omega \cos \Phi, \end{aligned}$$

в этой формуле использованы обозначения:  $\Phi$  – обобщенная фаза колебаний,  $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$  – орты в направлении осей  $Ox'', Oy'', Oz''$  ортогональной системы координат, в которой  $Oz''$  направлена параллельно магнитному полю, а ось  $Ox''$  – в сторону увеличения номера  $L$ -оболочек.

Тогда закон движения для частицы в области резонанса имеет следующий вид [7]:



$$\frac{dv_{\perp}}{dt} = -\frac{1}{\gamma} [\omega_1(v_{z''} + R_1)J_{m-1}(\beta) - \omega_2(v_{z''} + R_2)J_{m-1}(\beta)] \sin \eta + \frac{v_{z''}v_{\perp}}{2\omega_H} \frac{\partial \omega_H}{dz''};$$

$$\frac{dv_{z''}}{dt} = \frac{\omega_{rm}^2}{\gamma k_{z''}} \sin \eta - \frac{v_{\perp}^2}{2\omega_H} \frac{\partial \omega_H}{dz''}, \frac{d\eta}{dt} = \omega_r;$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\omega_{rm}^2}{k_{z''}\gamma v_{\perp}} \left(1 + \frac{\omega \cos^2(\alpha)}{m\omega_H - \omega}\right) \sin \eta + \frac{v_{\perp}}{2\omega_H} \frac{\partial \omega_H}{dz''},$$

где  $v_{z''}$ ,  $v_{\perp}^2$  – компоненты скорости частицы, при этом  $v_{\perp}^2 = v_x^2 + v_y^2$ . Кроме того, в формуле  $J_m$  – функция Бесселя первого рода, а  $k_{z''} = k \cos \theta = (\omega n/c) \cos \theta$ ,  $k_x'' = k \sin \theta$ . Также введены следующие обозначения:

$$\beta = k_x'' v_{\perp} / \omega_H, \alpha_1 = \omega_2 / \omega_1, \alpha_2 = e E_{z''}^{\omega} / \omega_1 m_e \gamma v_{\perp};$$

$$\omega_1 = e(B_x^{\omega} + B_y^{\omega}) / 2m_e, \omega_{\tau 0}^2 = \omega_1 k_{z''} v_{\perp};$$

$$R_{1,2} = (E_x^{\omega} \pm E_y^{\omega}) / (B_x^{\omega} \pm B_y^{\omega}),$$

$$\omega_{\tau m}^2 = (-1)^{m-1} \omega_{\tau 0}^2 [J_{m-1}(\beta) - \alpha_1 J_{m+1}(\beta) + \gamma \alpha_2 J_m(\beta)].$$

Для описания частиц, находящихся в РП, используется функция распределения частиц по параметрам: питч-углу и скорости, параллельной касательной к линии магнитного поля. Изменение функции распределения частиц при взаимодействии с излучением рассматривается как последовательность дискретных событий, соответствующих пролёту отдельной группы частиц в области резонанса, который сопровождается изменением в ней питч-угла.

Изменение функции распределения определяется через начальные и конечные состояния частиц. При расчете изменения функции распределения последовательно перебираются события, соответствующие пролёту определенной группы частиц через точку резонанса, и в функцию распределения вносятся соответствующие изменения. Относительное уменьшение концентрации частиц в радиационном поясе  $N_{io}^{\%}$  определяется через изменение функции распределения:

$$N_{io}^{\%} = 2\pi / N_{e0} \int_0^{\alpha_{lc}} \int_{v_{z''} = v_{\min} \cos \alpha}^{v_{\max} \cos \alpha} f_{eq}(v_{z''}, \alpha) v_{z''}^2 \sin \alpha / \cos^3 \alpha dv_{z''} d\alpha.$$

В последней формуле  $v_{\min}$ ,  $v_{\max}$  – минимальная и максимальная скорости резонирующих частиц, а  $\lambda_{\min} = \arccos \sqrt{R_E + h_m / (LR_E)}$ .

На основе рассмотренного подхода были произведены расчеты оценки потока высыпающихся частиц из искусственного радиационного пояса при воздействии на него ОНЧ излучения, инициированного работой РНС. Считалось, что ИРП расположен вблизи дакта, соответствующего магнитной оболочке  $L = 4$ , с высотой нижней границы 600 км и диаметром в нижней точке 100 км. Токовый момент ОНЧ источника полагался равным  $10^6$  А·м, а высота его расположения – 90 км. Расчеты показали, что такой источник создает в образующемся дакте (в области экватора) магнитное поле с индукцией ~5 пТ. Воздействие такого магнитного поля на частицы приводит к изменению их распределения по питч-углам. Типичные графики, позволяющие сравнить распределения частиц по питч-углам до и после воздействия, представлены на рис 1.

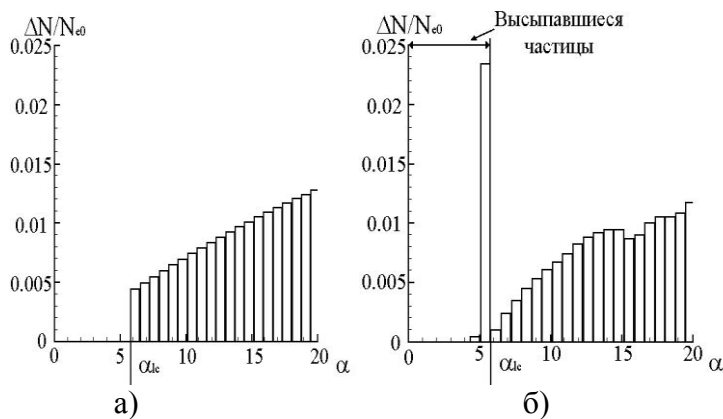


Рис. 1. Распределение частиц РП по питч-углам до начала воздействия (а) и через 300 с после воздействия (б)

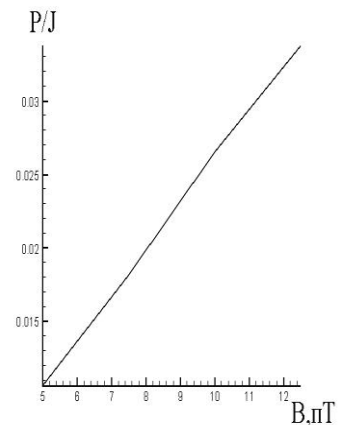


Рис. 2. Зависимость потока высыпавшихся частиц от амплитуды индукции ОНЧ поля

Из анализа этих графиков видно, что частицы с питч-углами меньше критического предела выпадают из РП. Зависимость потока высыпавшихся из РП частиц от амплитуды индукции ОНЧ поля показана на рис. 2. Как следует из анализа графика, относительный поток высыпавшихся частиц для рассматриваемого ОНЧ источника составляет  $P/J = 1.06 \cdot 10^{-2}$ . Процесс естественного затухания радиационного пояса можно оценить, используя диффузионную модель на основе уравнения Фоккера – Планка [8]. Для оболочки  $L = 4$  она дает значение естественного потока  $P/J \approx 3,6 \cdot 10^{-5}$ . На основе полученных данных можно сделать вывод, что имеет место увеличение потока высыпания заряженных частиц в области дакта над местом воздействия нагревного стенда, по сравнению с наблюдаемым там фоновым потоком, примерно в 200 раз.

### Список используемых источников

1. Морозова Е.И., Безродных И.П., Семёнов В.Т. Радиационные факторы риска для космических аппаратов // Вопросы электромеханики: труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – С. 35–40.
2. Радиационные пояса Земли и космические лучи / С.Н. Вернов, П.В. Вакулов, Е.В. Горчаков, Ю.И. Логачев. – М.: Просвещение, 1970.
3. Model for artificial ionospheric duct formation due to HF heating / G.M. Milikh, A.G. Demekhov, K. Papadopoulos, et al. // Geophysical research letters. – 2010. – Vol. 37, LXXXXX.
4. Лебедев Н.В., Наумов Н.Д., Руденко В.В. Моделирование нагрева нижней ионосферы модулированным высокочастотным излучением // Прикладная физика. – М.: ВИМИ, 2012. – №6. – С. 92–98
5. Лебедев Н.В., Руденко В.В. Моделирование распространения низкочастотного излучения в магнитосфере Земли // Физика плазмы. – 2015. – Т. 41, № 6. – С. 554–560
6. Котик Д.С., Поляков С.В., Яшинов В.А. Возбуждение волновода Земля-ионосфера низкочастотными источниками, расположенными в неоднородной ионосфере // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1978. – Т. 21, № 7. – С. 938–943.
7. Vortnik J. Precipitation of radiation belt electrons by lightning generated magnetospherically reflecting whistler waves / Stanford University. – Stanford, California, 2005.
8. Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера. – М.: Атомиздат, 1972.

В.Л. Фролов,  
доктор физико-математических наук  
ФГБНУ НИРФИ, г. Нижний Новгород

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ИСКУССТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ВЫСОТАХ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ DEMETER

Представлен обзор результатов проведенных в 2005–2010 гг. за время миссии искусственного спутника Земли DEMETER измерений характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцированных на высотах внешней ионосферы Земли при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощным КВ радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда СУРА.

Ключевые слова: модификация ионосферы мощными радиоволнами, искусственная ионосферная турбулентность, плазменные возмущения, спутниковые измерения.

### ВВЕДЕНИЕ

Определение возможностей и условий формирования на высотах внешней ионосферы и в магнитосфере Земли интенсивных вытянутых вдоль линий геомагнитного поля крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы (дактов) является важной задачей современных геофизических исследований. Ее решение может быть использовано в различных областях применения, включая модификацию магнитосферной плазмы ОНЧ–НЧ радиоволнами, распространяющимися в таких дактах. Одним из способов создания дактов может служить модификация  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации, когда вблизи уровня их отражения происходят генерация интенсивной искусственной ионосферной турбулентности, развитие возмущений плотности плазмы различных масштабов от долей метра до десятков километров и сильный разогрев электронов плазмы.

В работе представлен обзор результатов исследований свойств возбуждаемых во внешней ионосфере искусственных плазменных возмущений, выполненных в 2005–2010 гг. с помощью бортовой аппаратуры французского микроИСЗ DEMETER, детальное описание которого приведено в [1]. Результаты измерений, проведенных по программе СУРА – DEMETER, опубликованы в [2–10]. Отметим, что практически все измерения были выполнены в годы минимума солнечной активности в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях.

### СВОЙСТВА ДАКТОВ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

Одним из наиболее важных результатов, полученных при выполнении экспериментов по программе СУРА – DEMETER, явилось обнаружение формирования дактов с повышенной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы при модификации  $F_2$ -области мощными радиоволнами  $O$ -поляризации. Выполненные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1. Повышение плотности плазмы в дактах в большинстве случаев составляет  $\langle \delta N \rangle \approx 15 \div 25\%$  по измерениям концентрации электронов  $N_e$ . Размер дактов вдоль траектории искусственного спутника Земли (ИСЗ) – приблизительно поперек линий геомагнитного поля в широтном направлении – изменялся в пределах 60–130 км, при этом имея средние значения  $\langle L \rangle \approx 80 \div 100$  км.

2. Отличительной чертой регистрируемых дактов является присутствие в них высокого уровня флуктуаций электромагнитных полей в диапазоне частот от нескольких герц до десятков килогерц, а также наблюдающееся в ряде случаев значительное (на десятки децибел)

увеличение интенсивности сигналов ОНЧ передатчиков и уширение их частотного спектра до  $\pm (200\div 500)$  Гц.

3. Формирование дактов наблюдалось, когда модификация ионосферы осуществлялась на частотах волны накачки (ВН)  $f_{\text{ВН}} \leq 5$  МГц с достаточно высокой эффективной мощностью излучения ВН  $P_{\text{эф}} \geq 40$  МВт. Высота отражения ВН при этом находилась в пределах  $220\div 290$  км.

4. В целях усиления генерации искусственной ионосферной турбулентности за счет эффекта «магнитного зенита» [11] в случае применения среднеширотного стенда СУРА следует использовать пучок мощных радиоволн, наклоненный на угол  $\sim 12^\circ$  на юг от вертикали (для  $f_{\text{ВН}} \approx 5$  МГц).

5. Установлено, что рост ионной компоненты плотности плазмы в дакте определяется ионами кислорода  $O^+$ , превалирующими на высотах  $\sim 700$  км. Ионы водорода  $H^+$  всегда показывают уменьшение плотности (до 7 раз).

6. Дакт может содержать внутри себя до 10–15 неоднородностей плотности плазмы с размерами поперек геомагнитного поля  $\sim 20$  км.

7. Поскольку средний поперечный размер дактов составляет 80–100 км, то их гарантированное обнаружение возможно только в том случае, если ИСЗ проходит на близком ( $\leq 40$  км) расстоянии от центра возмущенной магнитной силовой трубки.

Невыполнение перечисленных выше условий для формирования дактов плотности плазмы объясняет отсутствие их регистрации практически во всех остальных проведенных нами сеансах модификации ионосферы по программе СУРА – DEMETER.

Основываясь на результатах всех проведенных измерений, можно заключить, что при выполнении перечисленных выше условий формирование дактов плотности плазмы при модификации  $F_2$ -области ночной ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации происходит с высокой вероятностью. Это позволяет использовать такие искусственные дакты в различных экспериментах по модификации состояния верхней ионосферы и магнитосферы Земли.

Формирование дактов с увеличенной плотностью плазмы наблюдалось и в экспериментах, выполняемых на стенде HAARP [12–15], в которых были получены аналогичные нашим величины увеличения плотности плазмы и показано, что формирование дактов – обычно наблюдаемое явление, что наиболее интенсивные дакты с  $\delta N$  до 40% формируются в условиях ночной ионосферы, когда мощная радиоволна излучается в магнитный зенит, в то время как в дневных условиях приращение плотности плазмы в дакте не превышает 10%, что в структуре дактов обнаруживаются неоднородности плотности плазмы с размерами поперек геомагнитного поля до 10–20 км. Кроме того, было установлено, что из области генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения ВН наблюдается вынос ионов наверх вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу, что согласно принятым моделям [14–16] и определяет формирование дактов.

## ПРОХОЖДЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВОЛНЫ НАКАЧКИ ВО ВНЕШНЮЮ ИОНОСФЕРУ

На основании полученных экспериментальных данных были изучены условия, когда энергия мощной радиоволны может просачиваться во внешнюю ионосферу при условии, что невозмущенный мощной радиоволной  $F_2$ -слой ионосферы являлся непрозрачным. В результате установлено следующее:

1) регистрация электрического поля ВН на высотах внешней ионосферы была возможна не только, когда  $f_{\text{ВН}} > f_{0F_2}$ , но и когда частота мощной радиоволны  $O$ -поляризации была меньше критической частоты  $f_{0F_2}$  до начала модификации ионосферы, но не больше чем на 0,5–0,7 МГц;

2) прошедшая в условиях  $f_{ВН} < f_{0F2}$  мощная радиоволна имела высокую интенсивность, которая по своей величине была выше на порядок интенсивности волн, зарегистрированных при излучении мощной радиоволны «на просвет»;

3) интенсивность сигнала ВН испытывала большие вариации для близких условий измерений;

4) имело место совпадение пятна с наибольшей интенсивностью сигнала с дактом повышенной плотности плазмы.

Прохождение излучения на частоте ВН во внешнюю ионосферу при модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением происходит за счет совместного влияния уменьшения на 10–20% плотности плазмы вблизи высоты отражения мощной радиоволны (образование полости с дефицитом плотности плазмы или фокусирующей линзы) и генерации искусственных неоднородностей плотности плазмы километровых масштабов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты выполненного в работах [10, 16] численного моделирования достаточно соответствуют основным результатам проведенных натуральных экспериментов. Все это, с одной стороны, позволяет считать, что имеет место достаточно полное представление о процессах, протекающих в модифицированной мощными радиоволнами ионосфере, а с другой – используя возможности численного моделирования, позволяет достичь более глубокого их понимания за счет получения необходимой дополнительной информации, которую не всегда удастся получить экспериментально. В первую очередь это касается изучения динамических процессов при формировании дактов плотности плазмы.

*Исследования выполнялись при поддержке гранта РНФ № 14-12-00556 в части анализа полученных экспериментальных данных.*

## Список используемых источников

1. Planetary and Space Science. – 2006. – Vol. 54(5). – P.409–557.
2. В.О. Рапопорт, В.Л. Фролов, Г.П. Комраков и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 8. – С.709.
3. В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Г.П. Комраков и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. 88, вып. 12. – С.908.
4. В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Г.П. Комраков и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 11. – С.915.
5. V.O. Rapoport, V.L. Frolov, S.V. Polyakov, et al. // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115.
6. Г.А. Марков, А.С. Белов, В.Л. Фролов и др. // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138, вып. 6(12). – С.1037.
7. В.Л. Фролов, Н.А. Митяков, Е.А. Шорохова, М. Парро. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 6. – С. 361.
8. В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 101, вып. 5. – С.229.
9. Фролов В.Л. // Солнечно-земная физика. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 22–45.
10. В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова, А.С. Белов, М. Парро, Ж.-Л. Рош // Изв. вузов. Радиофизика. – 2015. [Принята в печать].
11. Гуревич А.В. // УФН – 2007. – Т. 177, № 11. – С.1145.
12. G.M. Milikh, K. Papadopoulos, H. Shroff, et al. // Geophys. Res. Lett. – 2008. – Vol. 35.
13. Vartanyan A., Papadopoulos K., Parrot M. // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. – 2011. – Vol.73, №13. – P.1674.
14. A. Vartanyan, G.M. Milikh, E. Mishin, et al. // J. Geophys. Res. – 2012. – Vol. 117.

15. *Huba J.D., Joyce G, and Fedder J.A.* // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105, №A10. – P. 23, 35.
16. *Белов А.С.* // ЖЭТФ. – 2015. – Т. 148, вып. 4(10). – С. 758–765.

А.Х. Аджиев,  
доктор физико-математических наук, профессор;  
М.Ю. Беккиев,  
доктор техн. наук, профессор;  
С.Т. Казакова;  
Д.Д. Кулиев  
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

## ВАРИАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ГРОЗАХ

Проведен сравнительный анализ данных аппаратно-программного комплекса для измерения напряженности электрического поля атмосферы EFM550 и данных о молниевых разрядах, полученных грозопеленгационной сетью LS8000 в дни с грозами и без гроз.

Ключевые слова: грозопеленгационная сеть, грозопеленгатор LS8000, измеритель напряженности электрического поля атмосферы, EFM550, электрическое поле, метеорологические явления, молниевые разряды.

### ВВЕДЕНИЕ

Суточный ход значения напряженности электрического поля атмосферы служит объектом разделения глобальных и локальных факторов атмосферного электричества. Поэтому он изучен из всех закономерностей атмосферного электричества в большей степени [1, 2]. Наиболее значительные искажения в естественный ход напряженности поля атмосферы вносят грозовые процессы, связанные с генерацией объемного заряда в облаках, туманах и зонах осадков.

В ряде работ [1–3] отмечается, что при грозовых процессах имеет место значительный рост значений напряженности электрического поля по сравнению со значениями в ясную погоду. С целью более детального пространственно-временного анализа изменений электрического поля атмосферы в данной работе рассмотрены проведенные совместные исследования суточных вариаций напряженности электрического поля атмосферы при грозах и параметров разрядов молний в зоне репрезентативной регистрации датчиками электрического поля.

Работа посвящена рассмотрению результатов измерений напряженности электрического поля атмосферы при разрядах молний различных типов полярностей.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И СОСТАВ АППАРАТУРЫ

Методика измерений и состав аппаратуры выбирались с учетом возможности их работы без обслуживания длительное время, что позволяет собрать за короткий период времени достаточное количество измерений.

Для измерения напряженности электрического поля атмосферы при грозовых процессах был разработан аппаратно-программный комплекс, включающий в себя:

- измерители электрического поля атмосферы EFM550 фирмы *Vaisala*;
- грозорегистратор LS8000, также фирмы *Vaisala*;
- программное обеспечение для решения задач измерения, передачи и визуализации значений напряженности электрического поля атмосферы и параметров молниевых разрядов.

Аппаратно-программный комплекс EFM550 производит измерение значения напряженности электрического поля атмосферы с частотой 2 Гц, т.е. каждые 0,5 секунд. Максимальные и минимальные значения напряженности, которые может измерить EFM550, составляют  $\pm 10\,000$  В/м [4]. Измеренные значения сохраняются на жестком диске компьютера. По этим данным можно изучать суточные и сезонные вариации напряженности электрического поля атмосферы с помощью программного обеспечения аппаратно-программного комплекса

EFM550. На рис. 1 показан суточный ход напряженности электрического поля атмосферы за 26.05.2013.

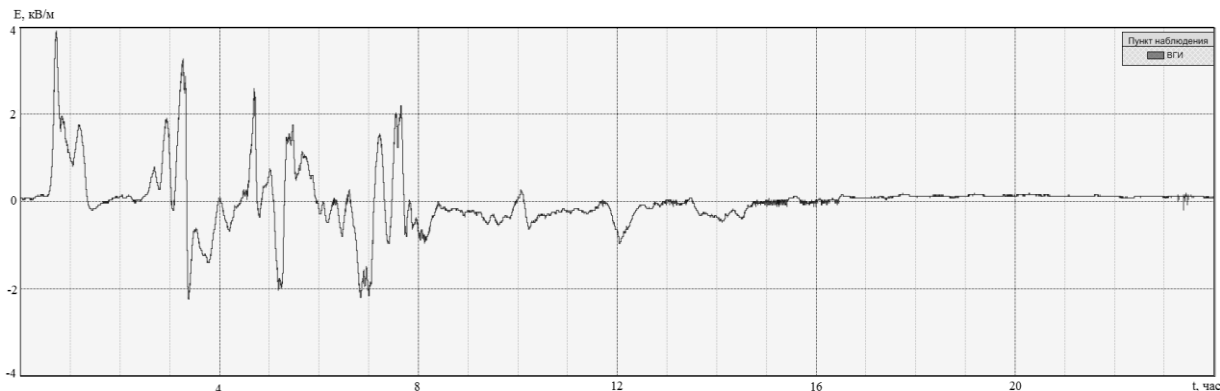


Рис. 1. Суточный ход напряженности электрического поля атмосферы за 26.05.2013

В данной работе для отслеживания вариации напряженности электрического поля атмосферы используется аппаратно-программный комплекс на основе измерителя напряженности электрического поля атмосферы EFM550 (Vaisala, Финляндия) [5], сенсор которого установлен на крыше здания ФГБУ «ВГИ» и имеет координаты: широту –  $43,4694^\circ$ , долготу –  $43,5861^\circ$ , высоту над уровнем моря – 540 м.

С целью выявления роли грозовых явлений в суточных вариациях напряженности поля атмосферы нами были проведены синхронные регистрации электрического поля и характеристик грозы.

Для определения местоположения и параметров молниевых разрядов в работе используется грозопеленгационная сеть LS8000, установленная на Северном Кавказе [3]. Для совместного исследования данных грозопеленгатора LS8000 и измерителя напряженности электрического поля EFM550 был выбран участок территории радиусом 10 км, с центром в точке установки датчика EFM550 в городе Нальчик (на крыше здания ВГИ, широта составляла  $43,4694^\circ$ , долгота –  $43,5861^\circ$ ), как показано на рис. 2.

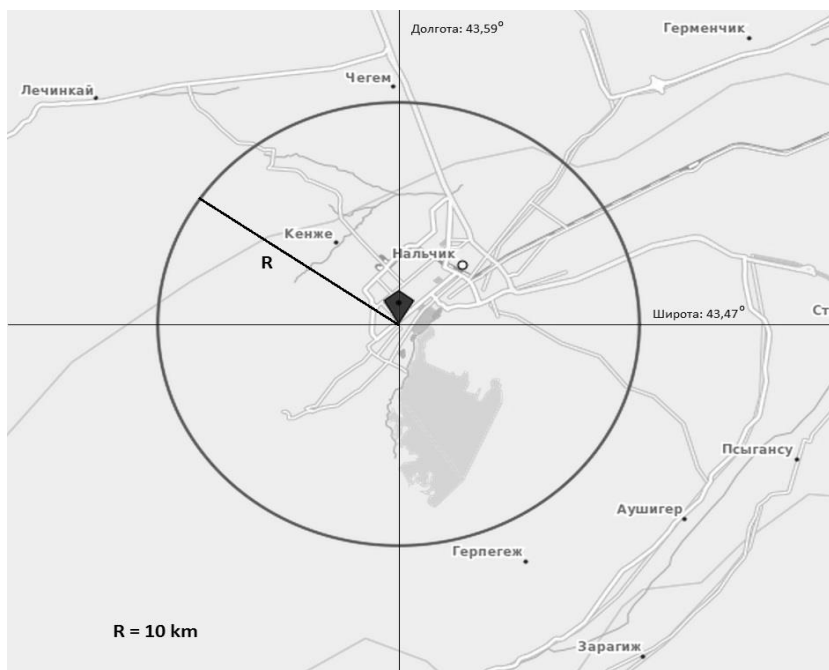


Рис. 2. Область совместного исследования данных LS8000 и EFM550



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Для анализа были выбраны дни как с грозами, так и без гроз в заданной области по данным грозопеленгационной сети. Данные о молниевых разрядах для выбранных дней (за каждый час) приведены в табл. 1 («LF-» – молниевые разряды облако-земля отрицательной полярности; «LF+» – молниевые разряды облако-земля положительной полярности; «VHF» – молниевые разряды облако-облако).

С помощью системы измерителя электрического поля получен ход напряженности за эти дни, и на них были наложены данные о количестве разрядов облако-земля и облако-облако, полученные при помощи грозопеленгатора LS8000. Результаты этих исследований сведены в табл. 1.

Таблица 1

### Информация о количестве и типах разрядов молний в различные дни на территории регистрации электрического поля

Дата	06.05.2013			13.05.2013			16.05.2013			17.05.2013		
	LF-	LF+	VHF	LF-	LF+	VHF	LF-	LF+	VHF	LF-	LF+	VHF
00.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02.00	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5
03.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
04.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05.00	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	5
06.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
07.00	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	4
08.00	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.00	0	0	0	0	0	1	2	1	28	0	0	5
11.00	0	0	0	1	0	0	5	2	75	0	0	1
12.00	0	0	0	7	2	103	30	7	57	7	1	16
13.00	0	0	0	69	13	1373	0	0	0	1	0	0
14.00	2	0	5	0	0	39	0	0	0	0	0	3
15.00	16	4	291	0	0	7	0	0	0	10	1	436
16.00	12	4	107	0	0	0	0	0	0	18	11	55
17.00	0	0	252	0	0	0	0	0	0	5	1	31
18.00	0	0	9	0	0	0	0	0	0	8	0	1
19.00	0	0	20	0	0	0	0	0	0	39	13	496
20.00	0	0	11	0	0	0	0	0	0	22	4	141
21.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
22.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Всего	30	8	700	77	15	1526	37	10	160	110	31	1224

На рис. 3 и 4 представлены данные напряженности электрического поля атмосферы, совмещенные с данными количества молниевых разрядов для дней с грозами над выбранной территорией. На рисунках изображены графики значений напряженности электрического поля атмосферы (соответствующая ось с левой стороны). В виде гистограммных столбиков показано количество молниевых разрядов над выбранной территорией (соответствующая ось с правой стороны).

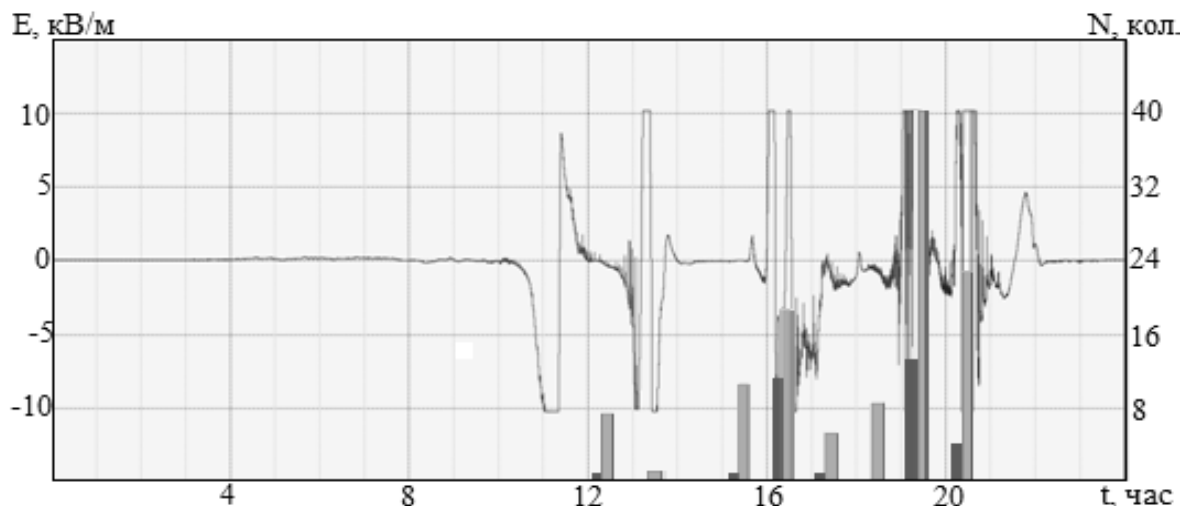


Рис. 3. Зависимость хода напряженности электрического поля и количества разрядов облако-земля от времени за 17 мая 2013 года (— количество положительных разрядов; — количество отрицательных разрядов)

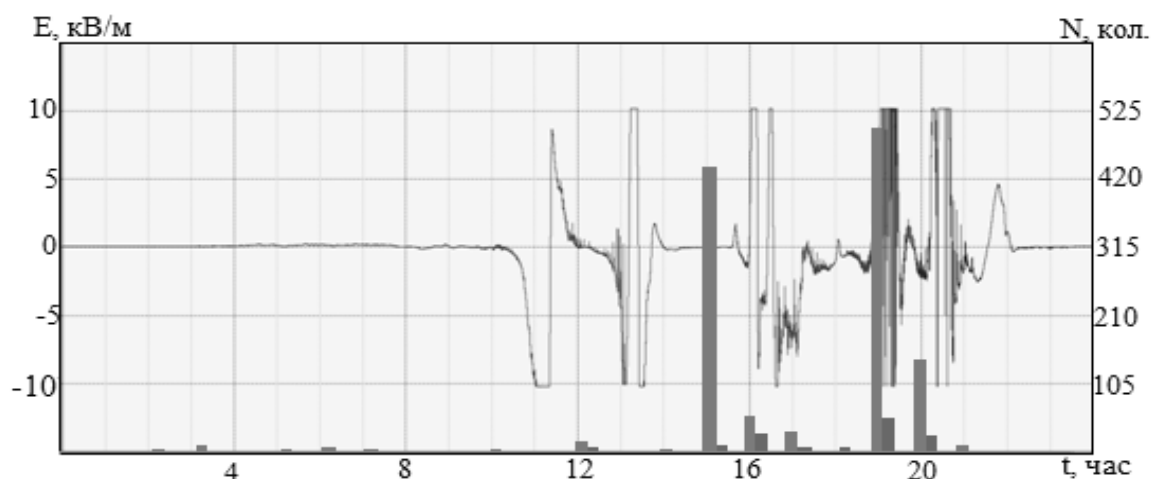


Рис. 4. Ход напряженности электрического поля и количество разрядов облако-облако и облако-земля (сумма положительных и отрицательных) от времени за 17 мая 2013 года (— количество разрядов облако-облако; — количество разрядов облако-земля)

Всего за исследуемые дни (6, 13, 16 и 17 мая 2013 года) в зоне действия измерителя (территория ограничена окружностью радиусом 10 км в точке установки EFM 550) зарегистрировано около 3928 разрядов. Из них: «VHF» – 3610, «LF+» – 64, «LF-» – 254.

Реакцией напряженности поля на молниевые разряды являются резкие скачки от нормального значения +130 В/м до значений от -10 кВ/м до +10 кВ/м после каждого разряда. Исходя из анализа табл.1, мы видим, что в момент резких скачков напряженности электрического поля атмосферы наблюдается грозовая активность.

Анализ полученных данных показывает:

1) имеется хорошая согласуемость данных грозопеленгационной сети LS8000 с данными измерителя напряженности электрического поля атмосферы EFM550, в особенности для молниевых разрядов облако-земля;

2) часть облачных молниевых разрядов EFM550 «не видит» (рис. 4). Это можно объяснить двумя причинами:

– облачный разряд настолько слабый и находится на таком расстоянии, что до EFM550 доходит слишком слабое возмущение электрического поля, ниже порога чувствительности датчика;

– облачный разряд был направлен горизонтально, поэтому направление вектора напряженности электрического поля в облаке перед этим разрядом было горизонтальным. А измеритель поля EFM550 замеряет вертикальную составляющую напряженности электрического поля атмосферы;

3) на рис. 4 мы видим, что после грозы напряженность электрического поля продолжает меняться в большом диапазоне. Это тоже можно объяснить несколькими причинами:

– могут выпасть осадки в районе установки измерителя напряженности электрического поля атмосферы. Так как частицы осадков могут иметь различные заряды разных знаков, это может влиять на показания измерителя напряженности;

– для наблюдений нами была выбрана территория радиусом 10 км, а на напряженность поля могли оказывать влияние грозы, происходящие за пределами данной территории.

### Список используемых источников

1. *Имянитов И.М., Чубрина Е.В.* Электричество свободной атмосферы. – Л.: Гидрометиздат, 1965. – 240 с.

2. *Имянитов И.М., Шифрин Н.С.* Современное состояние исследований атмосферного электричества // *Успехи физических наук.* – 1962. – Т. LXXVI, вып.4. – С.593–642.

3. *Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н.* Система грозопеленгации на Северном Кавказе // *Метеорология и гидрология.* – 2013. – №1. – С.5–11.

4. Измеритель электрического поля EFM550: руководство пользователя. – URL: <http://www.vaisala.com.2004> (дата обращения: 28.04.2016).

5. Программно-аппаратный комплекс мониторинга электрической напряженности приземного слоя атмосферы / А.Х. Аджиев, Д.Д. Кулиев, А.М. Абшаев, Ю.В. Болгов, Х.Х. Машуков // *Известия КБНЦ РАН.* – 2013. – №2(52). – С.49–56.

А.А. Алексеев;  
А.В. Жадковский;  
С.В. Кудрявцев\*;

Л.И. Чапурский,  
*кандидат техн. наук;*

Б.В. Шилин \*\*,

*доктор геолого-минералогических наук, профессор*

\* АО «Лептон», г. Москва.

\*\* Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, г. Санкт-Петербург.

## МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОНОВ И ЦЕЛЕЙ В ИНТЕРЕСАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В статье рассмотрены методы использования спектрофотометрических измерительных комплексов в интересах получения исходных данных для актуализации баз данных, используемых при информационном обеспечении систем дистанционных исследований на различных этапах их жизненного цикла в условиях ресурсных ограничений.

Ключевые слова: измерение, коэффициент спектральной яркости, спектрофотометр, видеоспектрометр, взаимодействие, база данных, обеспечение.

### ВВЕДЕНИЕ

При решении задач информационного обеспечения средств технического зрения (СТЗ), работающих на различных участках оптического диапазона спектра, которые применяются в системах дистанционных исследований наземного, морского, воздушного, космического и ракетного базирования, в качестве базового информационного продукта используются данные о коэффициентах спектральной яркости (КСЯ) целей и фонов. Эта фотометрическая величина для большинства природных и антропогенных объектов зависит от взаимного расположения исследуемой поверхности, источников ее освещения и приемника лучистой энергии СТЗ. Согласно определению, КСЯ ( $\beta_\lambda$ ) на длине волны ( $\lambda$ ) определяется как отношение яркости наблюдаемой поверхности ( $L_\lambda$ ) к яркости диффузного эталона ( $L_\lambda^{из}$ ), находящегося в тех же условиях освещения и наблюдения:

$$\beta_\lambda = L_\lambda / L_\lambda^{из} . \quad (1)$$

В 1930-е гг. в спектральных приборах, используемых для измерений КСЯ объектов в естественных условиях, регистрация спектров осуществлялась на фотографические эмульсии, поэтому измерения были ограничены видимым и ближним инфракрасными (ИК) диапазонами спектра, а спектральное разрешение получаемых данных составляло 10 нм. В качестве эталонов использовались гипсово-магниево-пластинки и баритовая бумага. Натурные исследования в характерных районах территории СССР выполнялись в околополуденное время, при безоблачной и малооблачной погоде, при наблюдении в надири и под различными углами рассеяния солнечных лучей для изучения индикатрисных факторов изменчивости КСЯ. На основании теоретического обобщения материалов более чем десятилетних исследований в работе [1] представлен каталог спектральных коэффициентов яркости 370 природных и искусственных объектов, измеренных в областях спектра: от 400 до 650 нм и от 700 до 900 нм.

В послевоенные годы с появлением фотоэлектронных умножителей и полупроводниковых чувствительных элементов в СССР были разработаны и созданы наземные, авиационные, аэростатные и спутниковые спектрофотометрические, микрофизические и гидрометеорологические приборы, с помощью которых выполнялись исследования спектральных отражательных, излучательных и пространственно-временных характеристик (ОИПВХ) природных и антропогенных объектов и фонов Земли и передаточных свойств атмосферы. Так, на самолете-лаборатории ГГО Ил-18 авиационные спектрометры, созданные в ЛГУ имени А.А. Жда-

нова, ГОИ имени А.И. Вавилова, ГГО имени А.И. Воейкова и в ВИКИ имени А.Ф. Можайского, обеспечивали измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), КСЯ и альbedo подстилающей поверхности и атмосферы, лучистых восходящих и нисходящих потоков и притоков на спектральном диапазоне от 0,35 до 14 мкм [2, 3]. В ГосНИЦИПР был разработан вертолётный спектрометрический комплекс, обеспечивающий измерения КСЯ объектов ландшафта при высотах Солнца от 2 до 90 градусов [4]. В работах [5–7] описаны аппаратура, методики и результаты спектральных исследований природных и антропогенных объектов в области спектра от 0,35–2,5 мкм, а также приведены списки литературы советских и зарубежных авторов по данной тематике. Модели ОИПВХ поверхностей на различных участках электромагнитного спектра представлены в работе [8].

### **ЭЛЕКТРОННАЯ БАЗА ДАННЫХ ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В 2011 г. была разработана электронная база данных (БД) по КСЯ объектов ландшафта на территории РФ, предназначенная для экспонетрических расчетов аппаратуры КА «Ресурс-П» [9]. При создании базы был использован интернет-ресурс, содержащий систематизированное обобщение опубликованных советскими авторами данных по КСЯ объектов ландшафта на спектральном интервале от 400 до 650–900 нм для 14 зон территории СССР [10], а также материалы по КСЯ объектов земной поверхности и атмосферы на спектральном интервале от 400 до 2500 нм, полученные специалистами ВКА имени А.Ф. Можайского и НИЦ 2 4 ЦНИИ МО в период 1962–2009 гг.

В настоящее время в БД КСЯ содержится более 2500 значений КСЯ наземных, водных и атмосферных природных и антропогенных объектов. Среди отечественных аналогов она является наиболее представительной по номенклатуре поверхностей и условиям наблюдения. Для учета геометрии съемки реализованы инженерные модели индикатрис яркости, позволяющие проводить пересчет надирных значений КСЯ на другие условия визирования. Программная реализация БД позволяет осуществлять поиск КСЯ объектов по классу и типу поверхностей в зависимости от условий наблюдения, редактировать существующие записи и заносить новую информацию. Информация о КСЯ заносится с учетом даты, времени, места и высоты наблюдения, состояния неба, углов и азимутов визирования относительно солнечного вертикала, спектрального и пространственного разрешения измерительной аппаратуры, а также значений границ каналов многоспектральных измерительных систем. В блоке моделирования предусмотрен расчет коэффициентов интервальной яркости (КИЯ) элементов ландшафта для многоспектральных систем, имеющих границы каналов, отличные от «стандартных». Разрабатывается новая программная оболочка БД, более удобная для пользователей.

Особую актуальность БД КСЯ имеет при решении следующих задач:

- обеспечения эксплуатации отечественных панхроматических, многоспектральных и гиперспектральных (МС и ГС) СТЗ, используемых на авиационных и космических («Метеор», «Канопус-В», «Ресурс-П», «Персона») аппаратах;
- разработки и использования автоматизированных методов и программ обработки МС и ГС информации;
- разработки требований к перспективным системам землеобзора космического, авиационного, ракетного, морского и наземного базирования;
- оценки эффективности предлагаемых промышленностью технических решений перспективных систем вооружения;
- оценки разведывательной доступности объектов для панхроматических, МС и ГС средств иностранной технической разведки.

Подавляющее большинство материалов, представленных в БД КСЯ, в видимом и ближнем ИК диапазонах имеют спектральное разрешение 5–10 нм, а в коротковолновом ИК – от 25 до 50 нм. Однако анализ тенденций развития существующих и перспективных СТЗ показал: не-

обходимо повышать спектральное разрешение содержащейся в БД информации до 2–3 нм в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах (0,3–1,0 мкм) и до 5–10 нм в коротковолновых ИК участках спектра (1,05–1,9 мкм и 1,9–2,5 мкм).

### **АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ АКТУАЛИЗАЦИИ БАЗ ДАННЫХ ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ**

Современные полевые спектрофотометры ASD FieldSpec-3 Hi-res на длинах волн от 0,3 до 1,05 мкм имеют спектральное разрешение менее 3 нм, а в коротковолновых ИК диапазонах – 10 нм. В базовой комплектации приемные устройства у этих приборов имеют угол поля зрения 26°. Для исследования СПЭЯ и КСЯ малоразмерных объектов и индикатрис яркости предусмотрены калиброванные оптические насадки, обеспечивающие измерения с углами поля зрения 10 и 1°. Кроме того, для измерения прямой и рассеянной солнечной освещенности и альbedo поверхностей имеются насадки с углом поля зрения 180°. При измерениях КСЯ поверхностей используются диффузные панели SphereOptics, имеющие коэффициенты отражения 95, 50 и 25%.

Проблема наполнения БД КСЯ более качественными данными пока решается благодаря неформальному взаимодействию специалистов Военно-космической академии с коллегами, имеющими в своем распоряжении современную аппаратуру: с сотрудниками МФТИ, географического факультета МГУ и СПб Ф ОАО КБ «Луч». Так, в БД включены новые данные по КСЯ, полученные с помощью FieldSpec-3 в ходе совместных экспериментов с МГУ и КБ «Луч» в июне 2014 и 2015 гг. в Ленинградской области. МФТИ в 2013–2015 гг. предоставлял во временное пользование прибор FieldSpec-3 для экспериментов в г. Санкт-Петербурге, в Мурманской, Брянской областях и в Крыму. Следует отметить, что в 2014 и 2015 гг. прибор МФТИ использовался для аттестации поверхностей, выбранных в качестве эталонных для выполнения замещающей калибровки бортовой аппаратуры КА «Ресурс-П» и «Канопус-В». Однако часть материалов 2015 г. не имела надлежащего качества из-за наблюдавшейся переменной облачности в жесткие периоды работы наземных экспедиций. Кроме того, ввиду ограниченной численности операторов, командированных для наземных экспериментов, не в полной мере использованы потенциальные возможности прибора по получению большего объема экспериментальных данных.

В настоящее время наиболее эффективным средством исследования отражательных характеристик поверхностей с высокими спектральным и пространственным разрешениями являются авиационные видеоспектрометры (АВС). При выполнении плановых полетов на самолетах АН-30 наряду с цифровыми фотоаппаратами и ИК сканирующим радиометром «Везувий» используются отечественные АВС «Фрегат» и «Лептон». Для получения изображений ландшафта с разрешением 0,1–0,2 м в видимом диапазоне спектра полеты выполняются на высотах 900–1100 м с путевой скоростью не менее 100 м/с. Такой режим полетов не оптимален для видеоспектрометров, имеющих мгновенный угол поля зрения 1 мрад и частоту регистрации спектральных кадров 28 и 60 Гц (соответственно у АВС «Фрегат» и «Лептон»). Гиперспектральные изображения, получаемые этими приборами на самолете Ан-30, имеют площадь проекции пикселя на земной поверхности 1 x 6 и 1 x 3 м<sup>2</sup>. Авиационные видеоспектрометры «Фрегат» и «Лептон» используются также в наземных экспериментах для измерения СПЭЯ и КСЯ объектов и фонов в интересах аттестации наземной тестовой мишенной обстановки; в исследованиях состояния сельскохозяйственных посевов, садово-парковых насаждений и леса, а также контроля заметности объектов и других задач. Визирование сюжетов осуществляется с использованием штатива, оснащенного поворотным механизмом, «с рук»; с подвижного автотранспорта и вышек. При этом строго соблюдаются правила расположения и измерения яркости эталонов.

После обработки гиперспектральных данных и формирования атрибутивной информации полученные материалы по КСЯ элементов поверхности ландшафта в видимом и ближнем ИК диапазонах заносятся в БД.

Для получения гиперспектральных данных с более высоким пространственным разрешением представляется целесообразным использовать имеющийся опыт выполнения спектральных и видеоспектральных съемок целей и фонов с вертолетов на испытательных полигонах и войсковых учениях [7, 11], а в состав наземных исследовательских групп необходимо включать специалистов организаций, располагающих необходимыми измерительными средствами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное решение проблемы актуализации БД КСЯ природных и антропогенных объектов в современной экономической обстановке в РФ возможно при официальном объединении сил и средств заинтересованных исследовательских организаций, участвующих в выполнении государственных программ.

## Список используемых источников

1. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. – Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 271 с.
2. Оптические свойства облаков в области спектра 0,4–14 мкм / О.И. Попов, И.С. Решетникова, Б.П. Сокольский, Е.О. Фёдорова, Л.И. Чапурский // ВОТ. – 1972. – Сер.10, вып.58. – С. 40–45.
3. Спектральные притоки лучистой энергии в тропосфере в диапазоне 0,4–2,4 мкм / К.Я. Кондратьев, О.Б. Васильев, В.С. Гришечкин и др. // Труды ГГО. – 1973. – Вып.322. – С. 12–35.
4. Спектрометрический комплекс / Ю.М. Кондратьев, А.Д. Доброзраков, С.Г. Яковлев, С.Н. Воякин, В.Ю. Ливотов; ГосНИЦ ИПР // Вестник с.-х. науки. – 1983. – № 2 (317). – С. 128–132.
5. *Толчельников Ю.С.* Оптические свойства ландшафта (применительно к аэросъемке). – Л.: Наука, 1974. – 252 с.
6. *Мелешко К. Е.* Спектрофотометрические исследования природных покровов Земли. – Л.: Недра. 1976. – 112 с.
7. *Чапурский Л.И.* Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. – МО СССР, 1986. – Ч.1. – 160 с.
8. *Зуев А.Л., Марков А.В., Чапурский Л.И.* Характеристики фонов, фоновых сюжетов, материалов и атмосферы / НИЦ 2 4 ЦНИИ. – СПб., 2000. – 126 с.
9. База данных для фоноцелевого информационного обеспечения систем дистанционных исследований, использующая ГИС-технологии / О.В. Григорьева, А.В. Марков, А.Г. Саидов, Л.И. Чапурский // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля природной среды: труды 3-й ВНК. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – С. 64–68.
10. URL: [www/http/gis-lab.info](http://gis-lab.info) (дата обращения: 21.09.2016).
11. Аппаратура, методики и результаты использования материалов видеоспектральной и тепловой аэросъемки для экологического мониторинга территорий и акваторий / О. В. Бровкина, О.В. Григорьева, В.Н. Груздев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. научных статей. – М.: ООО Азбука-2000, 2007. – Вып. 4, Т.1. – С. 209–215.

А.В. Артюшина;  
 Т.Б. Журавлёва,  
*доктор физико-математических наук;*  
 И.М. Насртдинов,  
*кандидат физико-математических наук;*  
 Т.В. Русскова,  
*кандидат физико-математических наук*  
 ИОА СО РАН, г. Томск

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УХОДЯЩЕГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛЯХ РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИ

В настоящей работе приведены результаты моделирования уходящего солнечного излучения в отдельных реализациях облачных полей (видимый диапазон). Представлен анализ эффектов, определяющих формирование яркости неба в различных условиях освещенности в зависимости от конфигурации облаков в выбранных реализациях при малых и средних баллах облачности. Полученные результаты сравниваются с расчетами радиационных характеристик в безоблачном небе.

Ключевые слова: солнечная радиация, метод Монте-Карло, изолированное облако, разорванная облачность, 3D эффекты облаков.

### МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ И МЕТОД РАСЧЕТА

Моделирование угловых характеристик поля радиации выполнялось в сферической модели атмосферы, заданной в глобальной декартовой системе координат  $OXYZ$ , центр которой совпадает с центром Земли (точка  $O$ ), а ось  $OZ$  определяется положением приемника (точка  $A$ ) на верхней границе атмосферы (ВГА). Результаты численного моделирования представляются в локальной системе координат  $O'X'Y'Z'$  (ЛСК), которая определяется центром  $O'=O$  и осью  $O'Z'$ , проходящей через точку наблюдения (ТН)  $A'$  на поверхности Земли. Направления «на детектор» и «на Солнце» задаются зенитными и азимутальными углами:  $\vec{\omega}_{det} = (\xi_{det}, \phi_{det})$  и  $\vec{\omega}_{Sun} = (\xi_{Sun}, \phi_{Sun})$ . Зенитные углы отсчитываются от положительного направления оси  $O'Z'$ . Положительное направление оси  $O'X'$  выбрано таким образом, что  $\phi_{det} = 180^\circ$ .

Количество центров облаков  $N$  в реализации площадью  $S$  разыгрывается по закону Пуассона и определяется соотношением

$$N = \min\{i : \prod_{k=0}^i \alpha_k < e^{-\eta S}\},$$

где  $\eta$  – двумерный параметр Пуассона, связанный с баллом облачности  $CF$  формулой

$$\eta = -\ln(1 - CF) / S_{sec};$$

$S_{sec}$  – площадь основания облака.

Моделирование равномерно распределенных точек на криволинейной поверхности (центров облаков) выполняется в соответствии с подходом [1]. Облака аппроксимируются опрокинутыми усеченными параболоидами вращения с полуосями основания  $R_x=R_y$  и геометрической толщиной  $H_{cld}$ . Центр облака определяется в сдвинутой локальной системе координат ( $O' \rightarrow A'$ )  $X'Y'Z'$  расстоянием между точкой наблюдения  $A'$  и проекцией центра параболоида на Землю ( $C$ ), азимутальным углом  $\phi_{cld}$  между лучами  $A'X'$  и  $A'C$  и высотой центра основания облака над поверхностью Земли  $Z_{cld}$  (подробнее – на рис. 1,б в работе [1]).

Моделирование диффузной солнечной радиации выполнено с использованием развитого ранее статистического алгоритма (метод сопряженных блужданий [2]). На ВГА=100 км пада-



ет параллельный поток монохроматического солнечного излучения мощностью  $\pi S_\lambda$ ; падающее излучение отражается от подстилающей поверхности (ПП) по закону Ламберта.

Облачное поле моделировалось на участке поверхности сферы радиуса  $R_0 + Z_{\text{cld}}$ , где  $R_0$  – радиус Земли, который вырезает на ней конус с вершиной, совпадающей с центром Земли. Площадь облачного поля была выбрана равной  $22500 \text{ км}^2$ , радиус соответствующей «окружности» на поверхности сферы составил  $\sim 84,5 \text{ км}$ . В наших расчетах центр облачного поля располагался над точкой наблюдения (центр ЛСК). Расчеты в видимой области спектра ( $0,55\text{--}0,555 \text{ мкм}$ ) получены при фиксированных параметрах облаков:  $R_x = H_{\text{cld}} = 5 \text{ км}$ ;  $Z_{\text{cld}} = 2 \text{ км}$ ; коэффициент ослабления  $\sigma_{\text{cld}} = 5 \text{ км}^{-1}$ ; альбедо ПП равнялось  $0,106$  (трава). Во всех расчетах полагалось, что  $\xi_{\text{det}} = 60^\circ$ ,  $\phi_{\text{det}} = 180^\circ$ .

Ранее [1] исследовалось изменение яркости безоблачного неба ( $I_{\text{clr}}$ ) при появлении *изолированного* облака. При переходе к *облачным полям* формирование радиационных характеристик при фиксированных значениях  $\xi_{\text{det}}$ , условиях освещенности и оптико-геометрических характеристиках облаков яркость неба  $I_{\text{cld}}$  зависит от конфигурации облачного поля. Изменчивость  $I_{\text{cld}}$  определяется присутствием (отсутствием) облаков на линии визирования (ЛВ), ее затененностью облаками (открытостью направления «на Солнце»), а также возможной подсветкой ЛВ близлежащими облаками. Помимо этого добавляются эффекты взаимного затенения облаков и их радиационного взаимодействия, когда часть выходящего через боковую поверхность облака излучения может многократно рассеиваться окружающими облаками.

В данной работе результаты совместного воздействия этих факторов обсуждаются на примере отдельных облачных реализаций.

## МАЛООБЛАЧНЫЕ СИТУАЦИИ

На рис. 1 представлены проекции двух различных реализаций облачного поля на плоскость  $X'O'Y'$  при балле облачности  $CF = 2$ . Реализация №1 характеризуется отсутствием облаков на линии визирования (рис. 1,а). В этом случае на формирование  $I_{\text{cld}}$  могут повлиять: радиация, отраженные от расположенных вблизи ЛВ облака (таковые в данном случае отсутствуют) и облака, лежащие в направлении «на Солнце», которые в зависимости от азимутального угла  $\phi_{\text{Sun}}$  могут затенять ЛВ и точку наблюдения  $A'$ . Данная ситуация может быть описана на основе эффектов, сформулированных при изучении изолированного облака.

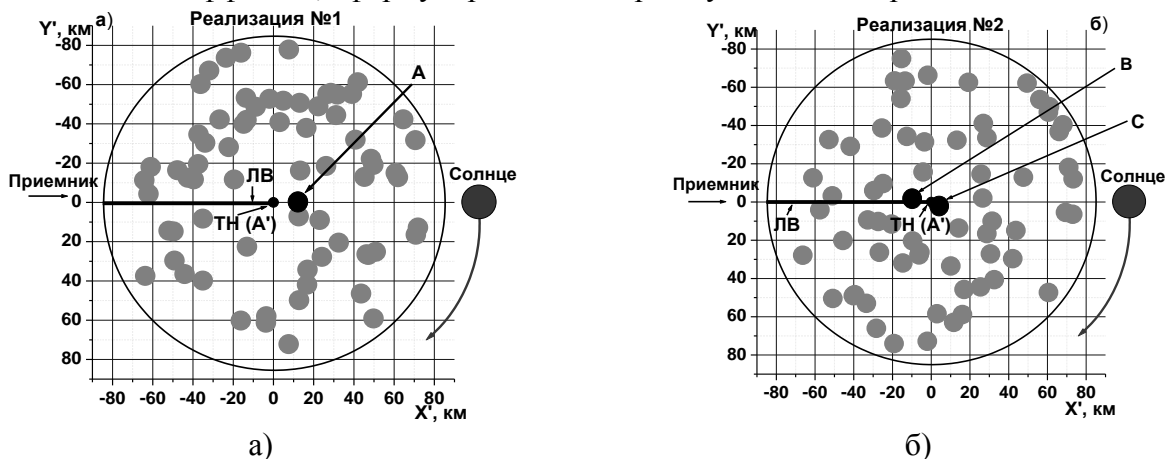


Рис. 1. Проекция облачных реализаций на плоскость  $X'O'Y'$  при  $CF=2$  (а, б); зависимость яркости неба от зенитных (в) и азимутальных (г) углов Солнца (начало)

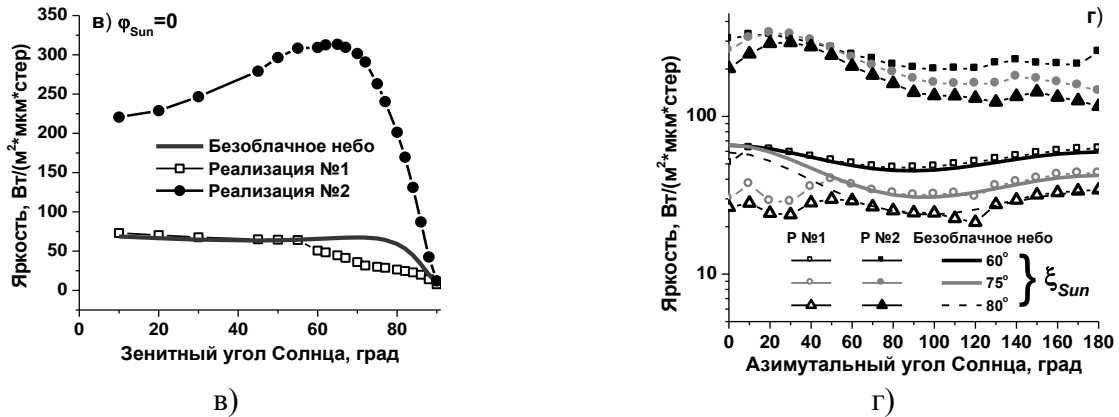


Рис. 1. Проекция облачных реализаций на плоскость  $X'O'Y'$  при  $CF=2$  (а, б); зависимость яркости неба от зенитных (в) и азимутальных (г) углов Солнца (окончание)

Рассмотрено изменение  $I_{\text{cld}}$  при азимутальном угле  $\phi_{\text{Sun}} = 0$  и возрастающем зенитном угле Солнца. Формирование яркости в значительной степени определяется облаком А (рис. 1, а и в). При  $\xi_{\text{Sun}} \leq 55^\circ$  и указанных параметрах расчета облако А не затеняет линии визирования и ТН, следствием чего является соотношение  $I_{\text{cld}} \approx I_{\text{clr}}$ . В диапазоне углов  $55^\circ \leq \xi_{\text{Sun}} \leq 82^\circ$  отрезок ЛВ и точка наблюдения затенены, следствием чего является уменьшение яркости неба по сравнению с безоблачными условиями. Неравенство  $I_{\text{cld}} \leq I_{\text{clr}}$  сохраняется и при дальнейшем увеличении  $\xi_{\text{Sun}}$ , когда ТН открывается для прямых солнечных лучей, тогда как линия визирования по-прежнему остается частично затененной.

В реализации №2 яркость определяется присутствием на небосводе двух облаков В и С. Облако В расположено на ЛВ, отрезок которой проходит сравнительно недалеко от вершины облака. Вследствие этого имеет место «всплеск» яркости за счет появления дополнительных рассеивателей и сравнительно небольшого ослабления излучения от входа в облако до отрезка ЛВ с освещенной стороны. Облако С частично затеняет линию визирования и перекрывает доступ прямых солнечных лучей к ТН до  $\xi_{\text{Sun}} = 80^\circ$  (при  $\xi_{\text{Sun}} > 80^\circ$  ТН открывается для нерассеянного излучения). Первый из этих конкурирующих факторов в совокупности с эффектом дополнительной подсветки облака В близлежащим облаком С является более сильным по сравнению с эффектом затенения ЛВ и  $I_{\text{cld}} \geq I_{\text{clr}}$  при всех  $\xi_{\text{Sun}}$ .

Наблюдается также немонотонная зависимость яркости облачного поля от зенитного угла Солнца (рис. 2, в). Это является следствием того, что с увеличением  $\xi_{\text{Sun}}$  (рис. 2, а) уменьшается угол рассеяния, и проявляется эффект сильной вытянутости «вперед» индикатрисы рассеяния излучения, длина оптического пути фотонов в пределах облака (рис. 2, б) вдоль направления  $\vec{\omega}_{\text{Sun}}$  сначала увеличивается, а затем уменьшается, и длина оптического пути фотонов от их вхождения в атмосферу до точки вхождения в облако С (рис. 2, в) увеличивается, вследствие чего ослабление излучения усиливается.

Зависимость  $I_{\text{cld}}$  от азимута Солнца для обеих облачных реализаций показана на рис. 2, г. В реализации №1 в интервале  $0 \leq \phi_{\text{Sun}} \leq \hat{\phi}_{\text{Sun}}(\xi_{\text{Sun}})$  формирование яркости неба происходит в соответствии с теми же механизмами, что и при  $\phi_{\text{Sun}} = 0^\circ$ : облака расположены достаточно близко к ТН, и их присутствие в направлении «на Солнце» приводит к уменьшению яркости безоблачного неба. При  $\phi_{\text{Sun}} \geq 45-50^\circ$  и значениях  $60^\circ \leq \xi_{\text{Sun}} \leq 80^\circ$  облака оказывают слабое влияние на яркость неба ( $I_{\text{cld}} \approx I_{\text{clr}}$ ), поскольку в этих условиях Солнце освещает облака, расположенные достаточно далеко от ТН. В реализации №2 наиболее близким к ТН является

облако С, влияние которого на  $I_{\text{cld}}$ , как было показано выше, не столь значительно по сравнению с влиянием облака В. Все остальные облака находятся на расстоянии не менее чем 20 км от ТН. Точка входа ЛВ в облако В всегда освещена, и именно это облако играет ключевую роль в формировании яркости неба:  $I_{\text{cld}} > I_{\text{clr}}$ .

## СРЕДНИЙ БАЛЛ ОБЛАЧНОСТИ

Реализация №1 при балле облачности  $CF = 5$  выбрана таким образом, что линия визирования при  $\xi_{\text{det}} = 60^\circ$  не пересекает ни одного облака. В то же время существуют облака, которые перекрывают направление «на Солнце» и  $I_{\text{cld}} \leq I_{\text{clr}}$ . При этом кривые  $I_{\text{cld}}(\phi_{\text{Sun}})$  при  $\xi_{\text{det}} = 75^\circ, 80^\circ$  характеризуются наличием локальных минимумов и максимумов, соответствующих направлениям  $\vec{\omega}_{\text{Sun}}$ , которые определяют большее или меньшее воздействие затенения ЛВ на  $I_{\text{cld}}$ .

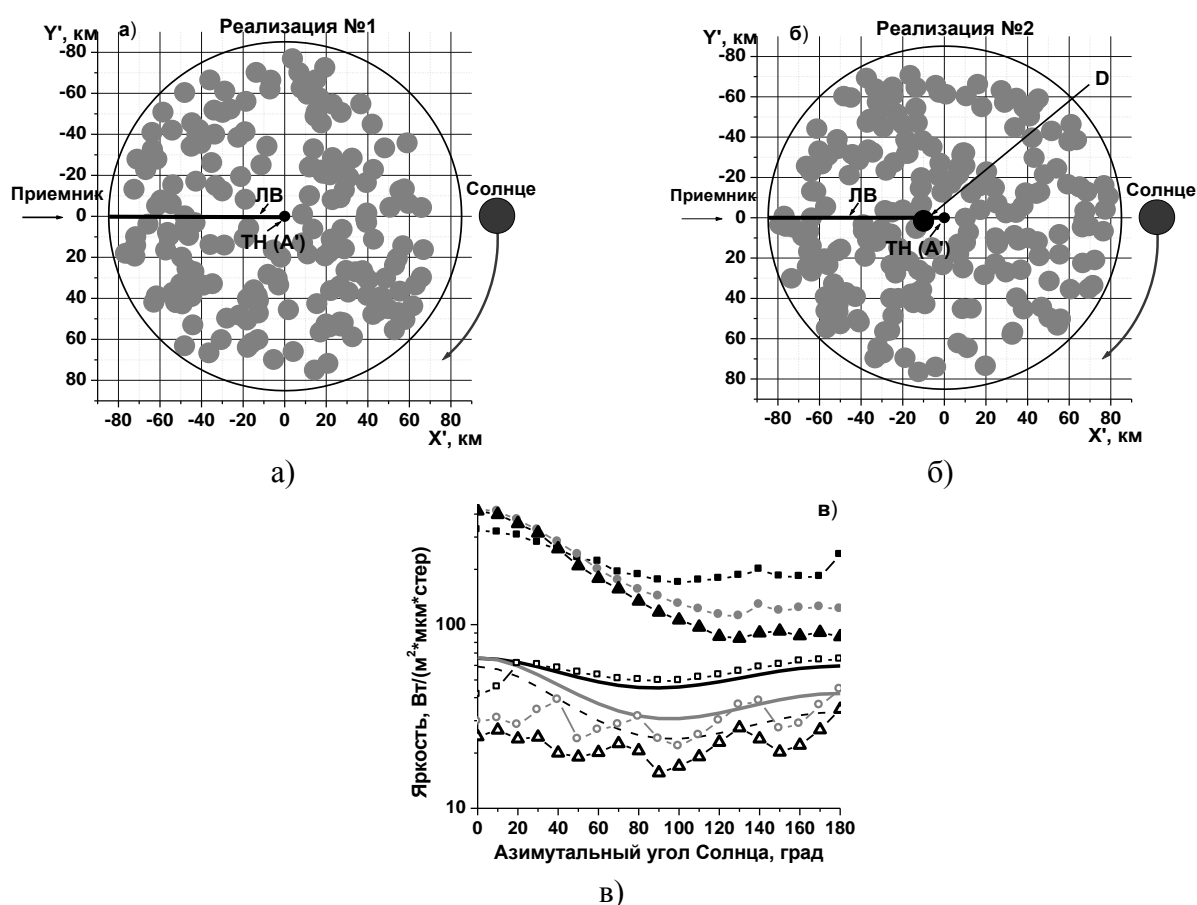


Рис. 2. Проекция облачных реализаций на плоскость  $X'O'Y'$  при  $CF=5$  (а, б); зависимость яркости неба от азимутальных углов Солнца (в)

Реализация №2 отличается тем, что ЛВ пересекает облако D, которое окружено группой облаков, обеспечивающих его дополнительную подсветку. Эти эффекты являются доминирующими по отношению к вкладу облаков вблизи к ТН и обуславливают затенение ЛВ, в силу чего  $I_{\text{cld}} > I_{\text{clr}}$  при изменении азимута в диапазоне  $0 \leq \phi_{\text{Sun}} \leq 180^\circ$ .

**Примечание.** Обозначения, использованные на рис.2, можно найти на рис.1,г.

Работа А.В. Артюшиной частично поддержана грантом РФФИ № 16-01-00617 А.

**Список используемых источников**

1. *Копытов Н.П. Митюшов Е.А.* Универсальный алгоритм равномерного распределения точек на произвольных аналитических поверхностях в трехмерном пространстве // *Фундаментальные исследования.* – 2013. – №4. – С. 618–622.
2. *Журавлёва Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Ч. I. Детерминированная атмосфера // *Оптика атмосферы и океана.* – 2008. – Т.21, № 2. – С. 99–114.

А.В. Баранюк\*;

В.П. Кулешов\*;

Л.М. Митник\*,

*доктор физико-математических наук, профессор;*

М.Л. Митник\*,

*кандидат техн. наук;*

Г.М. Чернявский\*\*,

*доктор техн. наук, член-корреспондент РАН;*

И.В. Чёрный\*\*,

*доктор техн. наук*

\*ТОИ ДВО РАН.

\*\*НТЦ «Космонит».

## МИКРОВОЛНОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН ЗЕМЛИ СО СПУТНИКА «МЕТЕОР-М» № 2

Рассмотрены особенности внешней калибровки микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» № 2. Используются расчетные значения яркостных температур  $T_a(\nu)$  над спокойными безоблачными районами океана и над тропическими лесами Амазонки. Стабильность работы радиометра оценена по временным рядам  $T_a(\nu)$  над Антарктическим плато и над Гренландией, которые сопоставлены с рядами  $T_a(\nu)$  по данным радиометра AMSR2 со спутника GCOM-W1. Каналы зондировщика на  $\nu = 52\div 57$  ГГц и в области линии 183,3 ГГц прокалиброваны по  $T_a(\nu)$ , рассчитанным по данным радиозондов. По данным МТВЗА-ГЯ построены глобальные поля  $T_a(\nu)$  и рассмотрены циклонические образования со штормовыми и ураганскими ветрами над океаном.

### ВВЕДЕНИЕ

Данные спутникового дистанционного зондирования обеспечивают уникальную возможность непрерывного мониторинга процессов и параметров в системе подстилающая поверхность – атмосфера. Для построения надежной системы наблюдения Земли из космоса в различных странах были предприняты серьезные усилия. Новые спутники с новыми сенсорами улучшают возможности изучения Земли за счет расширения перечня зондируемых геофизических параметров и повышения точности их оценки.

Важным вкладом в развитие глобальной системы наблюдения могут стать измерения многоканального микроволнового (МВ) сканера-радиометра МТВЗА-ГЯ с нового российского метеорологического спутника «Метеор-М» № 2, запущенного 8 июля 2014 г. на околополярную орбиту высотой 832 км с наклоном  $98,77^\circ$  [1]. На частотах сканера  $\nu$ , равных 10,65; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42,0; 48,0 и 91,65 ГГц, принимается излучение с вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациями, а на частотах зондировщика – 52–58 ГГц (длинноволновый скат полосы поглощения кислорода) и в области сильной линии поглощения водяного пара, центрированной на 183,31 ГГц – или на В-, или на Г-поляризации [2]. Показания сканерных каналов были преобразованы в яркостные температуры  $T_a(\nu)$  по данным как внутренней (по излучению холодного космоса и горячей согласованной нагрузки), так и внешней калибровки. Внешняя калибровка выполнялась по расчетным значениям  $T_a(\nu)$  над безоблачными районами океана при штилевых условиях и над тропическими лесами Амазонки [3]. Для калибровки влажностных каналов зондировщика значения  $T_a(\nu)$  были найдены по данным радиозондирования атмосферы на станции 04417 GEOSummit (The Greenland Environmental Observatory). Станция расположена на  $72,58^\circ$  с.ш.,  $38,48^\circ$  з.д. на высоте  $h = 3216$  м. Высота подъема радиозондов  $h_{pz} = 15\div 19$  км, а значения паросодержания атмосферы  $V$  варьировали в пределах  $0,1\text{--}2,5$  кг/м<sup>2</sup>. Для калибровки температурных каналов  $T_a(\nu)$  находились по радиозондовым профилям при условии, что  $h_{pz} > 35$  км.

## ДАННЫЕ

Радиометр МТВЗА-ГЯ сканирует Землю в полосе шириной 1500 км. Угол визирования составляет  $53,3^\circ$ , а угол падения –  $65^\circ$ . Восходящее излучение Земли принимается антенной диаметром 65 см. Размер элемента разрешения радиометра меняется от  $89 \times 189$  км на  $\nu = 10,7$  ГГц до  $9 \times 21$  км на  $\nu \approx 180$  ГГц. Размер пикселя на большинстве каналов равен  $32 \times 32$  км, а чувствительность составляет  $0,3\text{--}0,5$  К/пиксель [2]. МВ измерения начались 30 июля 2014 г.

Стабильность работы радиометра МТВЗА-ГЯ в космосе определялась по временным рядам среднесуточных значений  $T_y(\nu)$ , усредненных в пределах круговых тестовых площадок диаметром 100 км в Гренландии (район станции GEOSummit) и в Восточной Антарктиде (район станции Concordia,  $75,18^\circ$  ю.ш.,  $123,38^\circ$  в.д.,  $h = 3233$  м), которые сравнивались с рядами калиброванных яркостных температур на каналах AMSR2 со спутника GCOM-W1 [4]. Для интерпретации изменчивости показаний МТВЗА-ГЯ и AMSR2 были построены временные ряды температуры и влажности воздуха у поверхности по данным автоматических метеостанций и на различных уровнях над поверхностью – по данным радиозондирования на станции GEOSummit и реанализа ERA-Interim.

## АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Временные ряды яркостных температур  $T_y(\nu)$  МТВЗА-ГЯ и AMSR2 и метеорологических параметров охватывали период с 1 октября 2014 г. по 31 декабря 2015 г. Временные ряды на  $\nu = 10,65$  и  $\nu = 23,8$  ГГц показаны для площадок в Гренландии (рис. 1) и в Антарктиде (рис. 2).

Сезонная изменчивость  $T_y(10)$  AMSR2 и МТВЗА-ГЯ составляет примерно 6 К на В-поляризации и  $\approx 12$  К на Г-поляризации. Максимальные значения  $T_y(10)$  на В-поляризации равны  $\approx 220$  К и смещены относительно времени максимальных значений температуры воздуха примерно на месяц.

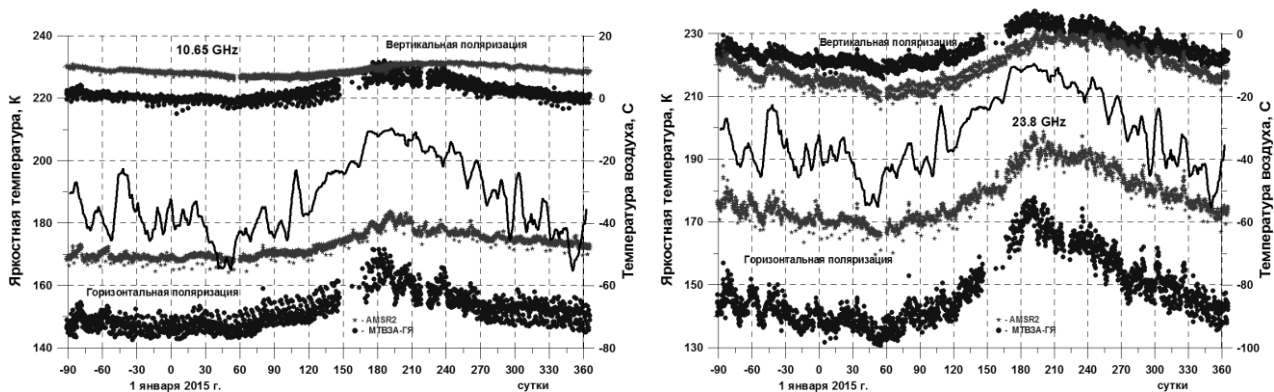


Рис. 1. Временные ряды усредненных среднесуточных яркостных температур для МТВЗА-ГЯ (точки) и AMSR2 (звездочки) на частотах 10,65 и 23,8 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях над тестовой областью в Гренландии с центром на  $72,58^\circ$  с.ш.,  $38,48^\circ$  з.д. Кривая линия – температура воздуха при 5-суточном скользящем усреднении

Амплитуда сезонной изменчивости яркостных температур на  $\nu = 18,7$  ГГц (рис.2) выражена явственнее, чем на  $\nu = 10,65$  ГГц. Такая амплитуда составляет  $\approx 15$  К на В-поляризации и  $\approx 22\text{--}24$  К на Г-поляризации. Вариации  $T_y$  по измерениям МТВЗА-ГЯ примерно такие же, как и по данным AMSR2 на В-поляризации, но на Г-поляризации заметны больше, чем на AMSR2, достигая  $\approx 30$  К. Вероятная причина таких различий – формирование излучения в приповерхностном слое меньшей толщины [5, 6].

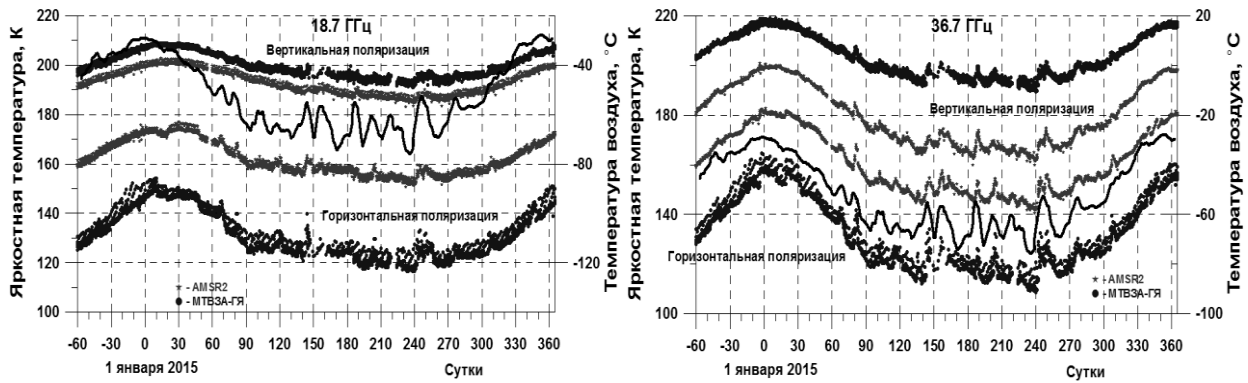


Рис.2. Яркостные температуры на частотах 18,7 и 36,7 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях по измерениям МТВЗА-ГЯ (точки) и AMSR2 (звездочки) с 1 ноября 2014 г. по 31 декабря 2015 г. над тестовой областью Антарктиды с центром на  $75,5^\circ$  ю.ш.,  $116,25^\circ$  в.д. и температура воздуха на станции Concordia ( $75,1^\circ$  ю.ш.,  $123,33^\circ$  в.д.) при 5-суточном скользящем усреднении (кривая линия)

Глобальные поля  $T_y$  на частоте 48,0 ГГц, которая раньше не применялась при спутниковых измерениях, показаны на рис. 3. Тропическая зона выделяется по повышенным значениям  $T_y$ , что обусловлено высоким паросодержанием атмосферы ( $V \geq 50$  кг/м<sup>2</sup>), мощной облачностью ( $Q \geq 0,5$  кг/м<sup>2</sup>) и осадками во внутритропической зоне конвергенции и в тропических циклонах.

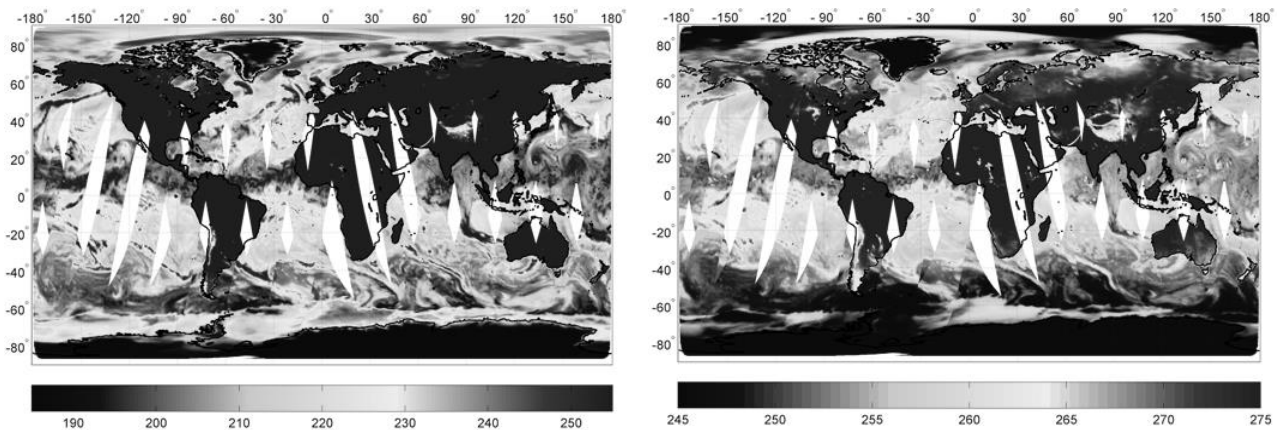


Рис.3. Яркостная температура Земли по измерениям МТВЗА-ГЯ на частоте 48,0 ГГц на горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) поляризациях 7 июля 2015 г.

На изображениях полярных областей Земли (рис. 4) на фоне морской поверхности хорошо виден морской лед, занимающий центральную область Арктики и акваторию вокруг Антарктиды. Яркостная температура льда в Арктике  $T_y \approx 255 \div 265$  К, а в Антарктике достигает 230–240 К. Центральные районы Гренландии и Восточной Антарктиды, высота которых превышает 3 км, характеризуются очень низкими яркостными температурами.

Опасные морские погодные системы, тропические, внетропические и полярные циклоны и вторжения холодных воздушных масс, характеризуются высокими скоростями ветра, повышенными значениями интегральных параметров атмосферы  $V$  и  $Q$  и осадками, что отображается в полях яркостных температур. На рис. 4 циклоническая циркуляция охватывает всё Бе-

рингово море. Несколько циклонов видны над водами, окружающими Антарктиду. На рис. 5 и 6 приведены поля  $T_y$  во внетропическом и тропическом циклонах.

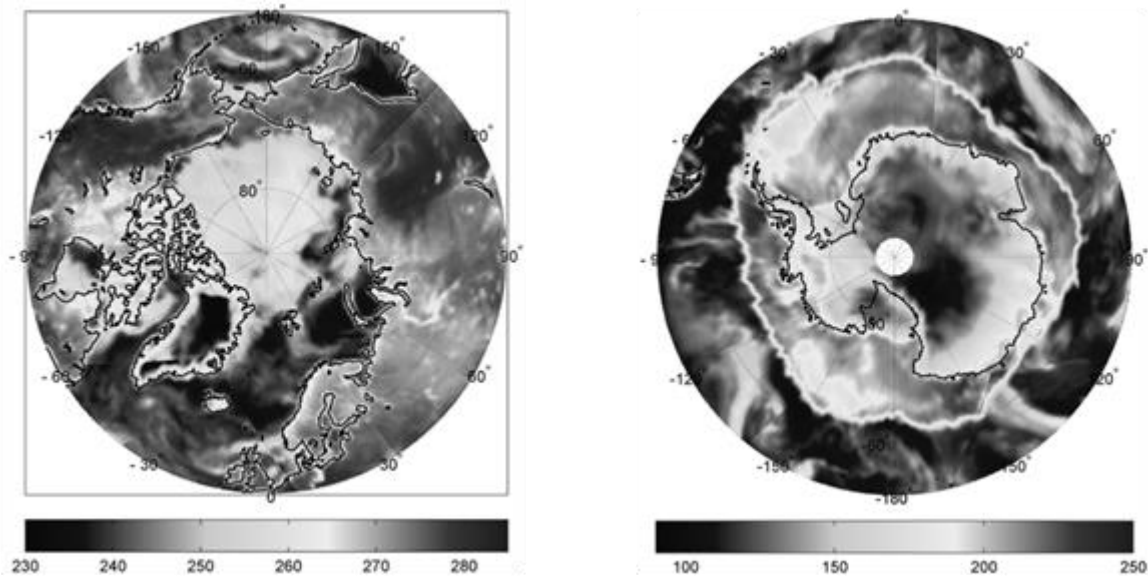


Рис.4. Яркостные температуры Арктики (слева) и Антарктики (справа) на частоте 31,5 ГГц на Г-поляризации по данным МТВЗА-ГЯ за 7 июля 2015 г.

Зимой скорость ветра в циклонах над северными частями Атлантического и Тихого океанов может достигать штормовых и ураганных значений [8]. Поля  $T_y$  циклона над Охотским морем и Тихим океаном по измерениям МТВЗА-ГЯ и AMSR2 1 декабря в 02, 13 и 16 Гр. показаны на рис. 5, что в сочетании с другими данными позволяет следить за его перемещением и эволюцией параметров.

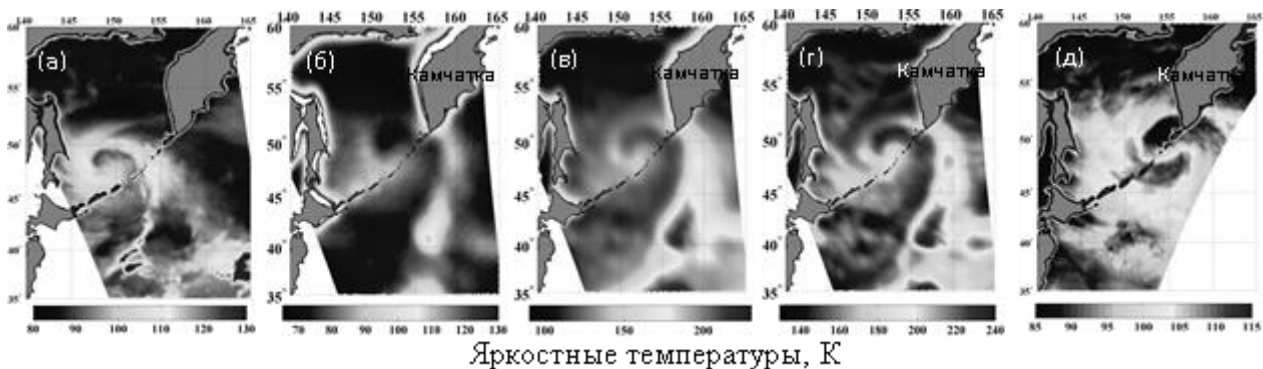


Рис.5. Внетропический циклон над Охотским морем в полях яркостных температур на горизонтальной поляризации по измерениям 1 декабря 2015 г. радиометрами AMSR2 (а и д) и МТВЗА-ГЯ (б–г) на частотах 10,6 ГГц в 02 Гр. (а), в 13 Гр. (б) и в 16 Гр. (д), на 23,8 ГГц (е) и 42,0 ГГц (г) в 13 Гр.

Тропический циклон (ТЦ) Dolphin на протяжении его жизненного цикла (9–21 мая 2015 г.) 15 раз находился в пределах полосы обзора радиометра МТВЗА-ГЯ и 16 раз – радиометра AMSR2. Дистанционное зондирование ТЦ выполнялось также скаттерометрами ASCAT и RapidSCAT со спутников MetOp-A, MetOp-B и с международной космической станции (ISS), спектрометрирами MODIS со спутников Terra и Aqua, радарными для изучения облачности и осадков со спутников CloudSat и GPM и другими сенсорами. Представление о полях при-



водного ветра, паросодержания атмосферы, водозапаса облаков и осадков в ТЦ Dolphin дают поля яркостных температур на частотах 18,7; 23,8 и 42,0 ГГц на горизонтальной поляризации, измеренные 15 и 19 мая 2015 г. и показанные на рис. 6. Так, 15 мая в 12 Гр. давление в центре ТЦ Dolphin  $P_{ц} = 955$  мб, а максимальная скорость ветра  $W_{макс} = 38$  м/с. Через четверо суток 19 мая в 12 Гр.  $P_{ц} = 965$  мб и  $W_{макс} = 38$  м/с.

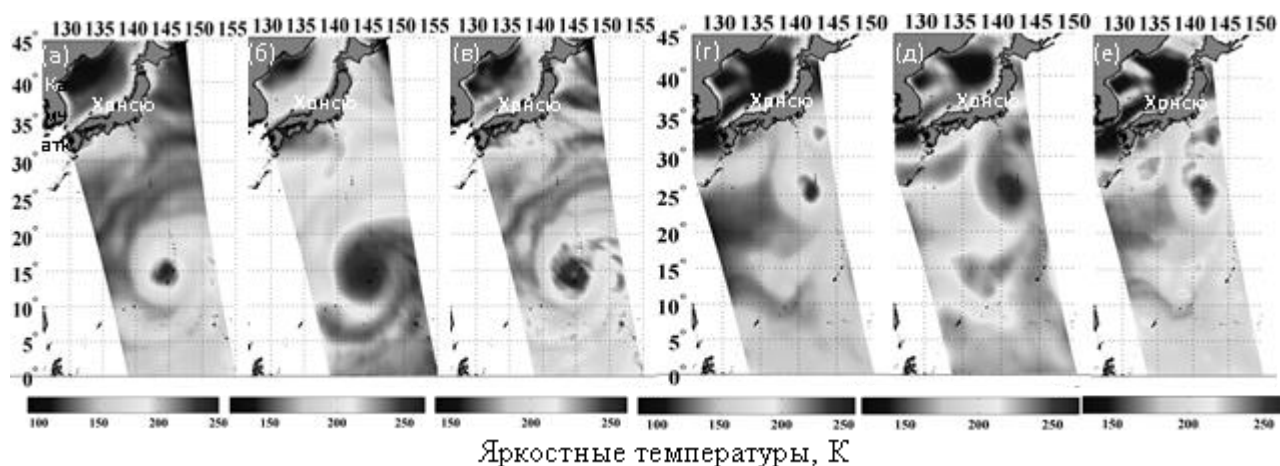


Рис.6. Тропический циклон Dolphin над северо-западной частью Тихого океана в полях яркостных температур на горизонтальной поляризации по измерениям МТВЗА-ГЯ 15 мая в 14:10 Гр. (а–в) и 19 мая 2015 г. в 14:30 Гр. (г–е) на частотах 18,7 ГГц (а, г), 23,8 ГГц (б, д) и 42,0 ГГц (в, е)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена предварительная внешняя калибровка яркостных температур  $T_{я}(v)$  радиометра МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» № 2. Показано, что радиометр МТВЗА-ГЯ функционирует стабильно. Продемонстрирован высокий потенциал МТВЗА-ГЯ при изучении материковых льдов Гренландии и Антарктиды, тропических лесов Амазонки, внутритропических и тропических циклонов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН 15-1-1-009 о. Авторы благодарят JAXA за предоставление данных AMSR2.

## Список используемых источников

1. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» / В.В. Асмус, В.А. Загребаяев, Л.А. Макриденко и др. // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 6. – С. 5–16.
2. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ/В.В. Болдырев, Н.Н. Горобец, П.А. Ильгасови др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5, № 1. – С. 243–248.
3. The MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M no. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters / L.M. Mitnik, I.V. Cherny, M.L. Mitnik, G.M. Chernyavskii, V.P. Kuleshov, A.V. Baranyuk // Abstract. Intern Symposium “Atmospheric Radiation and Dynamics” (ISARD – 2015), Saint-Petersburg-Petrodvorets. – June 2015. – P. 23–25.
4. Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change / K. Imaoka, M. Kachi, H. Fujii, H. Murakami, M. Hori, A. Ono, T. Igarashi, K. Nakagawa, T. Oki, Y. Honda, H. Shimoda. // Proc. of the IEEE. – 2010. – Vol. 98, № 5. – P. 717–734.

5. Multifrequency microwave emission the Dome-C area on the East Antarctic Plateau: Temporal and spatial variability / G. Macelloni, M. Brogioni, P. Pampaloni, A. Cagnati. // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. – 2007. – Vol. 45, №.7. – P. 2029–2039.
6. *Surdyk S.* Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica: an analytical approach // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 80. – P. 256–271.
7. Microwave instruments for observing tropical cyclones / K.B. Katsaros, L.M. Mitnik, P.G. Black. In: Typhoon Impacts and Crisis Management. Eds: DanLing Tang, GuangJun Sui. 2014. Springer. P. 5-61.
8. GCOM-W1 AMSR2 and MetOp-A ASCAT wind speeds for the extratropical cyclones over the North Atlantic / E.V. Zabolotskikh, L.M. Mitnik, B. Chapron // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 147. – P. 89-98.

В.А. Буката;  
С.Б. Варющенко,  
*доктор военных наук, профессор;*  
С.В. Косырев,  
*доктор военных наук, профессор;*  
А.Ф. Найданов,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **К ВОПРОСУ О РАДИОЛОКАЦИОННОМ НАБЛЮДЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

Представлены результаты теоретических расчетов изменения концентрации плазменных электронов в радиоактивном облаке при воздействии на него электромагнитного сигнала радиолокатора, приведено соотношение расчетной плазменной частоты радиоактивного облака с частотами радиолокаторов различных длин волн. Полученные результаты свидетельствуют о существенном увеличении электронной концентрации ионизированных образований в нижних слоях атмосферы в результате разрушения отрицательных ионов. Обосновано предпочтение использования радиолокаторов метрового диапазона длин волн промышленного производства для наблюдения за технологическими выбросами предприятий ядерного цикла.

Ключевые слова: электромагнитный сигнал, область повышенной ионизации (ОПИ), радиоактивное облако, электронная концентрация, радиолокационная станция, ионизированное образование.

Вопросами радиолокационного зондирования радиоактивных атмосферных образований (РАО) в разные годы занимались несколько групп ученых, результаты работ которых отражены в публикациях [1–3]. В них сделан вывод о принципиальной возможности использования радиолокационных станций (РЛС) для мониторинга за состоянием воздушной среды над предприятиями ядерного цикла (ПЯЦ).

Возможность применения радиолокационных средств (активная и пассивная радиолокация) для мониторинга ПЯЦ основана на том, что появление в нижних слоях атмосферы техногенного выброса радиоактивных веществ приводит к изменению физических параметров среды распространения радиоволн, что создает радиолокационный контраст и дает возможность обнаружения атмосферной неоднородности.

Большинство таких исследований рассматривает постоянное наблюдение технологических радиоактивных выбросов над ПЯЦ специально выделенной РЛС узконаправленного действия. Возможности радиолокационного контроля аварийных ситуаций ПЯЦ или РАО другого происхождения наиболее целесообразно обосновывать с помощью наблюдений, полученных в процессе ядерных испытаний.

В результате ядерного взрыва в атмосфере образуется радиоактивное облако, которое представляет собой клубящуюся массу воздуха, перемешанную с продуктами взрыва, окислами азота воздуха, множеством мелких капель воды, находящейся в воздухе, и частицами грунтовой пыли.

Область атмосферы, содержащая радиоактивные продукты (осколки деления), представляет собой область повышенной ионизации (ОПИ), следовательно, ее можно рассматривать как плазменное образование [4].

Распространение электромагнитного сигнала (ЭМС) через плазменное образование подчиняется определенным закономерностям, среди которых важнейшее значение имеет зависимость прозрачности плазмы для ЭМС от ее внутренней плазменной частоты.

Как известно, электромагнитные сигналы радиолокаторов с частотами меньше плазменной частоты полностью отражаются от нее, при близких частотах происходит поглощение сигнала, при превышении частоты сигнала над частотой плазмы сигнал претерпевает искривления под различными углами и затухания в зависимости от степени ионизации среды.

Собственная частота плазмы (в данном случае ОПИ) рассчитывается по формуле

$$f_0 = \frac{\sqrt{n_e \times e^2}}{2\pi \sqrt{\epsilon_0 \times m_e}} \quad [\text{Гц}], \quad (1)$$

где  $n_e$  – концентрация электронов,  $\text{см}^3$ ;  
 $e$  – заряд электрона,  $e = -4,8 \cdot 10^{-10}$  ед. заряда СГСЭ в системе СГСЭ;  
 $m_e$  – масса электрона,  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг;  
 $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха.

Известно, что через один час после ядерного взрыва общая активность бета-излучения оценивается величиной порядка 400 бета-мегаюри на килотонну энергии взрыва, и поскольку 1 бета-мегаюри соответствует  $3,7 \cdot 10^{16}$  расп/с., скорость излучения бета-частиц равна  $1,5 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$  [4].

Если для спада активности продуктов взрыва во времени справедлив закон  $t^{-1,2}$ , то при ядерном взрыве мощностью в  $q$  килотонн скорость излучения бета-частиц в секунду равна  $1,5 \cdot 10^{19} q t^{-1,2}$ , где  $t$  – время после взрыва в часах.

Среднюю энергию частицы можно полагать равной 1 МэВ [4]. Поскольку для образования одной пары – одного электрона и одного положительного иона – требуется 34 эВ, скорость образования свободных электронов будет равна  $4,4 \cdot 10^{23} q t^{-1,2}$ .

Энергия остаточного гамма-излучения приблизительно равна энергии бета-частиц, поэтому скорость образования свободных электронов под воздействием гамма-излучения также определяется уравнением  $4,4 \cdot 10^{23} q t^{-1,2}$  [4]. Это означает, что скорость образования свободных электронов под действием запаздывающего излучения через один час после взрыва мощностью, например  $q = 100$  кт, составит примерно  $8,8 \cdot 10^{25}$  эл/с. в заданном объеме пространства (т. е. в радиоактивном облаке). Расчеты показывают, что изменение скорости образования электронов в радиоактивном облаке в период с первого до шестого часа после взрыва будет составлять от  $8,8 \cdot 10^{25}$  до  $1,02 \cdot 10^{25}$  эл/с. Как видно, уменьшение скорости образования электронов в течение достаточно продолжительного времени незначительно.

Объем радиоактивного облака, представляющего собой тороид, приближенно можно считать как  $V_{\text{обл}} = \pi (D_{\text{в}}/2)^2 2\pi(D_{\text{г}}/2)$ , где  $D_{\text{г}}$  – горизонтальный диаметр облака, а  $D_{\text{в}}$  – вертикальный диаметр облака. Зная, что для ядерного взрыва мощностью 100 кт  $D_{\text{г}} = 6$  км,  $D_{\text{в}} = 1,7$  км, получим объем облака:  $V_{\text{обл}} = 30,6 \text{ км}^3$  или  $30,6 \times 10^{15} \text{ см}^3$ .

Примем распределение электронов в радиоактивном облаке равномерным. В этом случае средняя скорость образования электронов в одном кубическом сантиметре радиоактивного облака на 1 час после взрыва составит:  $8,8 \cdot 10^{25} / 30,6 \cdot 10^{15} \approx 2,88 \cdot 10^9$  эл/см<sup>3</sup>с.

Образование основных частиц в плазменном облаке описывается системой нелинейных уравнений [5]. Однако для оценки влияния отдельных процессов взаимодействия на ионный состав плазмы можно использовать некоторые упрощения.

В частности, для оценки электронной концентрации  $n_e$  в радиоактивном облаке с учетом рекомбинации электронов и их прилипания к нейтральным частицам, можно рассматривать сухой воздух и ограничиться уравнением следующего вида:

$$dn_e/dt = J - \alpha_r n_e^2 - n_e \nu_s + J_d, \quad (2)$$

где  $\nu_s$  – частота прилипания низкоэнергетичных электронов в воздухе;  
 $J$  – скорость наработки электронов;  
 $\alpha_r$  – коэффициент рекомбинации электронов с положительными ионами;  
 $J_d$  – удельная скорость отлипания электронов.

В установившемся режиме решение уравнения (2) имеет следующий вид:

$$n_e = -\frac{v_s}{2\alpha_r} + \left( \frac{v_s^2}{4\alpha_r^2} + \frac{J_1}{\alpha_r} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $J_1 = J + J_d$ .

Учитывая молекулярный состав воздуха при давлении  $\sim 10^5$  Па в области температур плазменных электронов  $1 \div 10$  эВ, частота прилипания электронов  $v_s$  составляет  $\sim 3 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  [2, 5]. Коэффициент рекомбинации электронов  $\alpha_r$  в атмосферном воздухе лежит в пределах  $\sim 1,6 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ .

Отсюда следует, что для существования электронной компоненты плазмы с электронной концентрацией  $n_e \sim 10^6 \text{ см}^3$  при атмосферном давлении воздуха необходимо, чтобы скорость наработки электронов была не меньше  $J \sim 10^{12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ . В обычных условиях это возможно только при достаточно высоком уровне активности выбросов [2, 5]. При наличии внешнего электрического поля (электромагнитный импульс локатора) в значительной мере возрастает скорость реакции разрушения отрицательных ионов кислорода. Так, при  $E_0 \sim 10 \text{ кВ/см}$ , что ниже предела пробоя воздуха, скорость разрушения отрицательных ионов составляет  $\sim 10^{12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ , и равновесие между процессами образования отрицательных ионов кислорода ( $\text{O}_2^-$ ) и их разрушением стабилизируется. В результате можно получить плазму с высокой концентрацией электронов [5].

Активность частиц радиоактивного облака, возникающего в результате ядерного взрыва, значительно превосходит активность частиц технологических выбросов АЭС. При радиолокационном зондировании воздушного пространства ионизированные области оказываются под воздействием мощного электромагнитного сигнала. В этих условиях можно считать, что скорость разрушения отрицательных ионов под воздействием электромагнитных импульсов радиолокаторов будет превосходить скорость прилипания электронов к нейтральным атомам (т.е. образование отрицательных ионов) и потери электронов, обусловленные их прилипанием к нейтральным частицам, будут стремиться к нулю. В этом случае справедливым будет полагать, что концентрация электронов, так же как и положительных ионов, будет определяться уравнением вида

$$n_e = \left( \frac{J}{\alpha_r} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

В нашем случае при скорости образования электронов  $2,88 \cdot 10^9 \text{ эл/см}^3 \text{ с}$  электронная концентрация в условиях состояния равновесной плазмы в соответствии с выражением (3) составит  $1,44 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . При воздействии на радиоактивное облако электромагнитными сигналами радиолокационных станций ПВО в соответствии с выражением (4) это значение будет равно  $\sim 1,2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Представленные данные полностью совпадают с расчетами электронных концентраций, полученными в работе [3], основанными на экспериментальных исследованиях ( $n_e \sim 10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-3}$ ).

При определении частоты плазмы в зависимости от концентрации электронов использование формулы (1) позволяет получить значение частоты, равное  $\sim 8,77 \cdot 10^8 \text{ Гц}$ , что превышает значение частот ЭМС РЛС дециметрового ( $600 \div 800 \text{ МГц}$ ) и особенно метрового ( $100 \div 300 \text{ МГц}$ ) диапазонов. Следовательно, сигналы РЛС метрового и дециметрового диапазонов длин волн в течение длительного времени будут отражаться от ионизированных образований. ЭМС РЛС сантиметрового диапазона будет подвержен значительному искажению.

Необходимо отметить, что размер ионизированной области будет расширяться за счет ионизации воздуха выпадающими радиоактивными частицами (т. е. действия шлейфа радиоактивного облака), одновременно с этим степень ионизации пространства будет уменьшаться посредством снижения количества радиоактивных продуктов в ионизированной области, снижая при этом собственную частоту плазмы. С учетом этого эффект отражения ЭМС РЛС

от ОПИ в большей степени характерен для станций метрового диапазона длин волн. Таким образом, использование РЛС этого диапазона наиболее предпочтительно для обнаружения и определения параметров ионизированных образований.

#### Список используемых источников

1. *Богданов В.Б.* Чернобыль. Двадцать пять лет назад. Исследования и эксперименты в зоне четвертого блока ЧАЭС // Наука и жизнь. – 2011. – № 5.
2. Использование импульсных радиолокаторов СВЧ диапазона для контроля радиоактивных выбросов в атмосферу / А.Н. Диденко, Ю.П. Усов, Ю.Г. Юшков и др. // Атомная энергия. – 1996. – Т. 80, вып. 1. – С. 47–53.
3. *Боярчук К.А., Кононов Е.Н., Ляхов Г.А.* Радиолокационное обнаружение областей локальной ионизации в приземных слоях атмосферы // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19, вып. 6. – С. 67–72.
4. Действие ядерного оружия: перевод с англ. / под ред. Е.М. Соминского. – М.: Воениздат, 1963. – 684 с.
5. *Григорьев В.П., Томашова О.В.* Моделирование процессов ионизации в атмосфере, инициируемых радиоактивными выбросами // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 5. – С.16–18.

О.В. Григорьева,  
кандидат техн. наук;  
Д.В. Жуков;  
А.В. Марков,  
кандидат техн. наук;  
В.Ф. Мочалов;  
А.Н. Николенко\*

\* Московский физико-технический университет, г. Долгопрудный.

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГО- И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ В ВИДИМОМ И БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ МЕЛКОВОДНОЙ ЧАСТИ МОРЕЙ**

В статье проанализирована возможность использования данных много- и гиперспектральной аэрокосмической съемки для определения типа дна в прибрежных частях морей. На основе анализа закономерностей изменения коэффициентов спектральной яркости водной среды, полученных по экспериментальным и расчетным данным, предложены эмпирические показатели, классифицирующие поверхность дна мелководных частей акватории с учетом рефракции и поглощения света в воде. С использованием данных авиационного видеоспектрометра НПО «Лептон» и данных многоспектральной съемки с КА WordView-2 определены типы дна, наиболее характерные для исследуемых участков акватории Черного моря и Финского залива.

Ключевые слова: данные много- и гиперспектральной съемки, коэффициент спектральной яркости, классификация, спектральные индексы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Регулярная оценка динамики и сохранения биоресурсов водных объектов имеет большое значение в условиях всё возрастающей нагрузки на морскую среду. При этом важное место в системе мониторинга состояния и загрязнения прибрежных вод Российской Федерации и других районов Мирового океана занимают космические системы дистанционного зондирования Земли, возможности которых по исследованию морских биоресурсов существенно расширились с началом эксплуатации отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА) с многоспектральной (МС) и гиперспектральной (ГС) аппаратурой наблюдения (КА «Ресурс-П», WordView-2, WordView-3 и др.).

Одной из задач, эффективно решаемых на основе анализа данных МС и ГС съемки, является идентификация донных отложений и ареалов распространения различных типов водорослей, развитие которых непосредственно связано с физическими, химическими и биологическими процессами, протекающими в водной среде.

В настоящее время методам изучения акваторий по данным МС и ГС съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне посвящено достаточно большое количество работ [1–3]. Однако задача классификации типов дна осложняется тем обстоятельством, что процессы поглощения и рассеивания излучения в толще воды искажают спектральные сигнатуры донных отложений. Для решения этой проблемы специалистами Военно-космической академии (ВКА) имени А.Ф. Можайского в 2014–2015 годах на территории Крымского федерального округа были организованы экспериментальные исследования по определению спектральных индексов, позволяющих производить донную классификацию на основе обработки МС и ГС изображений с учетом коррекции ослабления излучения толщей воды.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В процессе экспериментальных исследований были задействованы авиационный видеоспектрометр НПО «Лептон» (спектральное разрешение  $0,4 \div 13$  нм, спектральный диапазон  $402 \div 1031$  нм) и наземный спектрорадиометр FieldSpec 3.0 (спектральное разрешение  $3 \div 10$  нм, спектральный диапазон  $350 \div 2500$  нм). При натуральных измерениях (in situ) проводился замер глубины на опорных точках. С помощью наземного спектрорадиометра FieldSpec 3.0 были выполнены натурные измерения спектральных свойств различных типов дна, характерных для исследовавшейся прибрежной акватории Черного моря, и измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ<sup>1</sup>) воды на различных глубинах до 3 м. Дополнительно для оценки возможности классификации поверхности дна по данным МС съемки привлекались изображения, полученные с КА WordView-2.

## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МС И ГС ИЗОБРАЖЕНИЙ

При обработке экспериментальных данных использовались статистические и полуаналитические методы анализа, основанные на расчете КСЯ водной толщи с помощью известных моделей.

Примеры спектральных сигнатур дна (без учета влияния толщи воды), полученных в результате обработки экспериментальных данных ГС съемки, приведены на рис. 1. На рис. 2 представлен пример спектральных сигнатур водной среды, усредненных по результатам более 30 измерений, для дна, покрытого галькой.

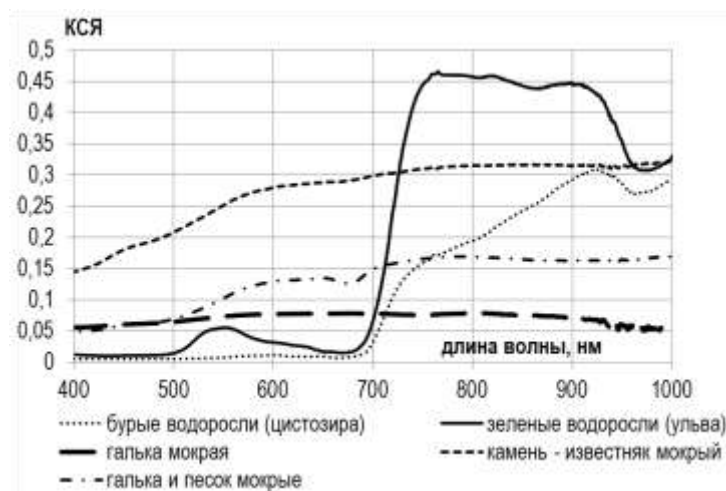


Рис. 1. КСЯ различных типов дна (грунты открытые и заросшие водорослями), характерных для акватории Чёрного моря

Влияние эффектов рассеяния и поглощения в толще воды на переотраженное от дна солнечное излучение в общем случае может быть учтено с помощью радиационной модели переноса излучения в воде [4]. Использование этой модели и спектральных характеристик дна, полученных в ходе эксперимента, позволило провести расчеты КСЯ водной толщи для каждого типа донных отложений при различных глубинах. Результаты расчетов позволили выделить устойчивые закономерности изменения значений КСЯ воды в зависимости от глубины и типа дна, а также разработать следующие спектральные индексы, учитывающие ослабление излучения водной толщей.

<sup>1</sup> Коэффициент спектральной яркости – отношение спектральной плотности энергетической яркости исследуемой поверхности к спектральной плотности энергетической яркости идеально рассеивающей поверхности.



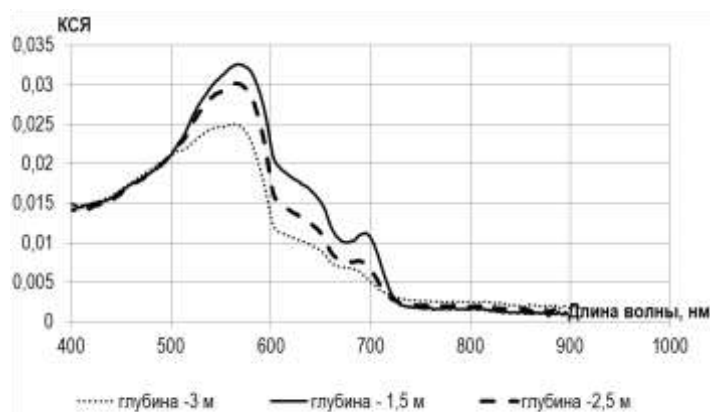


Рис. 2. Спектральные характеристики водной поверхности при разных глубинах для дна, покрытого галькой

Для идентификации дна с открытым грунтом (песок, галька) авторами данной работы определен индекс, описываемый выражением

$$K_r = (r_{570} - r_{480}) / (a_1 H + b_1) \text{ [м}^{-1}\text{]}, \quad (1)$$

где  $r_\lambda$  – значение коэффициента спектральной яркости на длине волны  $\lambda$ ;

$H$  – глубина акватории, м;

$a_1, b_1$  – эмпирические поправочные коэффициенты для каждого типа грунта, учитывающие влияние толщи воды на изменение индекса.

Для дна, покрытого водорослями, авторами предложен индекс, задаваемый несколькими формулами:

– для зеленых водорослей:

$$K_v = (r_{540} - r_{480}) / [(r_{540} + r_{480})(a_2 H + b_2)] \text{ [м}^{-1}\text{]}, \quad (2)$$

– для бурых водорослей:

$$K_v = (r_{604} - r_{480}) / [(r_{604} + r_{480})(a_2 e^{b_2 H})] \text{ [м}^{-1}\text{]}, \quad (3)$$

где  $a_2, b_2$  – эмпирические поправочные коэффициенты для различных типов донной растительности.

Эмпирические коэффициенты учитывают изменения КСЯ толщи воды от глубины, а также наличие в воде органических и взвешенных веществ, способных к рассеиванию и ослаблению света в воде, поэтому рассчитываются для каждого типа вод. Их определение возможно двумя способами в зависимости от наличия исходных данных для построения функциональной зависимости между глубиной и отношением яркостей, используемых в формулах (1)–(3):

– на основе натуральных измерений глубины и КСЯ водной среды на опорных точках;

– на основе расчета КСЯ водной толщи с использованием модели переноса излучения в воде [4] и натуральных измерений концентрации взвешенных веществ, хлорофилла «а» и его производных, вносящих основной вклад в ослабления излучения водой для разных типов вод.

Например, для Черного моря в районе Севастопольской бухты коэффициенты  $a_1$  и  $b_1$  оказались равны -0,003 и 0,013.

При обработке данных МС и ГС съемки в интересах классификации донных отложений решение об отнесении дна к конкретному типу должно приниматься исходя из оценок значе-

ний индексов  $K_r$  и  $K_b$ . Например, при  $K_r=0,8$  (или  $K_r=1,2$ ) тип дна с вероятностью 80% можно классифицировать как гальку.

При использовании данных ГС съемки для идентификации водорослей может использоваться дополнительный индекс – длина волны в пределах спектрального интервала 660÷750 нм, на которой градиент спектральной характеристики переходит через ноль. В этом интервале для спектральной сигнатуры водорослей характерен локальный максимум значений яркости на длине волны около 710 нм (для бурых водорослей) и 720 нм (для зеленых водорослей).

На основе выявленных закономерностей отражения излучения дном в различных спектральных зонах и полученных индексов был разработан алгоритм классификации донных отложений, который предусматривает два этапа обработки данных МС и ГС съемки. На первом этапе производится обязательная атмосферная коррекция изображений в прибрежной зоне (например, с помощью программы Modtran 5.3.2), на втором – выделяются границы акватории, в пределах которых осуществляется кластеризация данных с последующим распознаванием кластеров по разработанным индексам методом последовательных иерархий.

Апробация алгоритма классификации донных отложений осуществлялась по материалам видеоспектрометра «Лептон», полученным в ходе летно-экспериментальных работ на участке акватории Черного моря в районе г. Севастополя, а также по данным МС съемки с КА WordView-2 акватории Финского залива. Результаты классификации были оценены в ходе натурных исследований прибрежной части акватории Черного моря и Финского залива. Например, спектральные индексы были верифицированы по представительным выборкам значений КСЯ воды, измеренным *in situ* для глубин акватории в диапазоне от 1 до 3 м. Коэффициент корреляции между расчетными значениями и измеренными *in situ* величинами индекса составил 0,87, а расхождение в значениях не превышало двадцати процентов. Это является допустимой погрешностью, поскольку даже если индекс  $K_r$  будет равен или близки 1,00 по модельным расчетам, а по реальным данным он примет значение 0,83, то он в любом случае будет классифицирован как галька, так как для водорослей он принимает значения менее 0,2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что данные дистанционного зондирования на мелководных участках акватории позволяют рассчитать оптические характеристики воды, которые содержат информацию не только о водной среде, но и об отражательных свойствах донных отложений, тем самым позволяя их идентифицировать, но с учетом ослабления излучения толщей воды. Принимая это во внимание, в статье предложены специальные спектральные индексы и разработанный на их основе алгоритм классификации дна, исходными данными которого является глубина, КСЯ водной среды в нескольких интервалах видимого диапазона спектра и коэффициенты регрессии, учитывающие степень изменения КСЯ с глубиной для исследуемого типа вод.

Реализация рассмотренного алгоритма позволила создать карты поверхности дна мелководной части исследуемых акваторий и сделать следующие выводы. Для обследуемых участков акватории Севастопольской бухты типичным видом дна являются ил и бурые водоросли, местами – галька и песок, а для района Невской губы характерно распространение макрофитов (высшей водной растительности), которые появляются за счет заболачивания, и песчаного дна как естественного происхождения, так и образовавшегося за счет активного намыва территории.

Возможность исследования границ распространения различных типов дна других морей должна быть направлена на пополнение базы данных спектральных характеристик, типич-

ных для этих акваторий донных отложений и водорослей (ил, кораллы, твердые породы, в том числе осадочные, и др.). На основе спектральных свойств и предложенных индексов, учитывающих ослабление излучения в толще воды, задачу оценки запасов водных биоресурсов по данным МС и ГС съемки возможно решать для любых прибрежных акваторий Мирового океана.

### Список используемых источников

1. *Копелевич О.В., Лаппо С.С.* Использование спутниковых данных для исследования и мониторинга морей и океанов // Современные проблемы исследования Земли из космоса. – 2005. – Вып. 2, т. 1. – С. 30–39.
2. *Фефилов Ю.В.* Математическое и программное обеспечение информационной технологии дистанционного определения параметров первичной биопродуктивности // Исследовано в России: электронный журнал. – 2003. – С. 1907–1923. – URL: <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2003/159.pdf> (дата обращения: 13.07.2016).
3. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли. – М.: Мир, 1988. – 351 с.
4. *Григорьева О.В., Жуков Д.В.* Возможности авиационной и космической съемки для определения глубин прибрежных акваторий // Сборник трудов III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – 2014. – Т.2. – С. 261–267.

Д.А. Коберник;  
В.А. Никольский,  
*кандидат техн. наук;*  
В.В. Руденко,  
*кандидат физико-математических наук, доцент*  
ФГКУ «12 ЦНИИ», г. Сергиев Посад

## ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ, ЗАГЛУБЛЕННЫХ В ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, ПРИ ПОМОЩИ НИЗКОЧАСТОТНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Посредством численного моделирования получена оценка возможности обнаружения заглубленных под поверхностью Земли объектов сложной конфигурации при помощи радиоизлучения, создаваемого ионосферным или находящимся в волноводе Земля – ионосфера низкочастотным источником.

Ключевые слова: волновод Земля – ионосфера, дифракция, электромагнитное подземное зондирование, СНЧ излучение.

Возбужденное в волноводе Земля – ионосфера сверхнизкочастотное (СНЧ) радиоизлучение способно распространяться на значительные расстояния. Поскольку глубина скин-слоя для грунтовых пород в рассматриваемом диапазоне длин волн может достигать нескольких километров, то находящийся не очень глубоко под поверхностью земли объект с электромагнитными свойствами, отличающимися от свойств подстилающей поверхности, будет рассеивать падающее на нее излучение. Расчет уровней рассеянного электромагнитного поля над подстилающей поверхностью Земли в окрестности заглубленного объекта позволяет определить возможность его регистрации на фоне естественных шумов для идентификации объекта. В настоящее время к источникам, способным обеспечить распространение СНЧ радиосигнала на значительные расстояния можно отнести наземные антенные станции типа ЗЕВС [1] и ионосферные источники, создаваемые нагревными стендами типа HAARP на основе эффекта Гетманцева [2, 3]. Целью настоящей работы является проведение расчетной оценки возможности обнаружения заглубленных в подстилающей поверхности земли объектов при помощи низкочастотного радиоизлучения. Для этого разработана математическая модель, позволяющая описать процесс рассеяния низкочастотного радиосигнала на заглубленном объекте. Модель предполагает двухэтапное решение задачи. На первом этапе определяются параметры электромагнитной волны от низкочастотного источника в глубине подстилающей поверхности при отсутствии объекта. Расположение источника радиосигнала рассматривается либо в волноводе Земля–ионосфера, либо в нижней ионосфере. На втором этапе непосредственно решается задача дифракции радиоизлучения на заглубленном объекте.

Алгоритм численного моделирования распространения низкочастотного радиосигнала в глубину подстилающей поверхности, основанный на точном решении электродинамической задачи в волноводе, ионосфере и под поверхностью земли, был подробно изложен в работах [3–6]. Расчеты проводились в сферической системе координат с началом в центре Земли с полярной осью, проходящей через излучающий диполь, как показано на рис. 1.

Поведение амплитуд магнитных компонент поля, создаваемых горизонтальным электрическим диполем (ГЭД), находящимся в ионосфере, или горизонтальным магнитным диполем (ГМД) в волноводе, были исследованы в работе [6] для грунтов с различной проводимостью. В исследованиях частота источника излучения составляла  $f=100$  Гц, магнитный момент ГМД  $P_M=1,1 \cdot 10^{11}$  А·м<sup>2</sup>, токовый электрический момент ГЭД:  $I = 1,0 \cdot 10^6$  А·м. Проведенные в статье [6] расчеты показали, что для источника в виде ГМД в волноводе или ГЭД в ионосфере

при распространении по сферическому волноводу Земля – ионосфера преобладающими по амплитуде являются компоненты электромагнитного поля  $E_r$ ,  $H_\varphi$  и  $H_\theta$ .

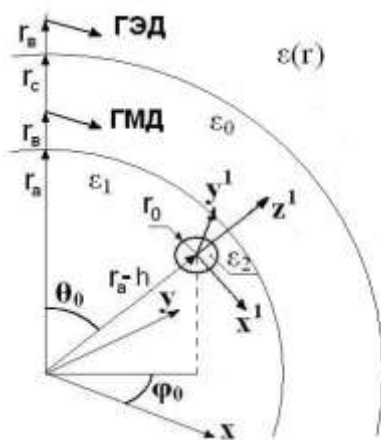


Рис. 1. Взаимное расположение систем координат, горизонтальных магнитного (ГМД) и электрического (ГЭД) диполей заглубленного объекта в точке  $(r_a-h, \theta_0, \varphi_0)$

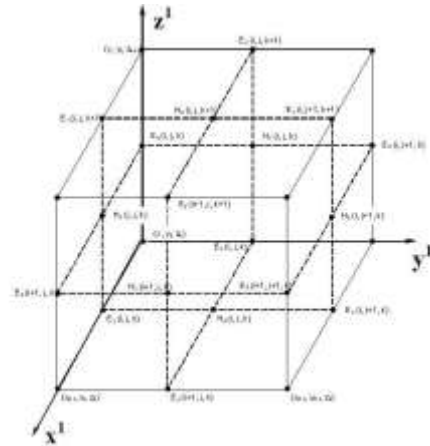


Рис. 2. Расположение компонент электрического и магнитного полей относительно расчетной ячейки сетки

На границе волновод – Земля компонента  $E_r$  является нормальной к поверхности раздела и при ее переходе испытывает скачок в  $\epsilon_1$  раз. Компоненты  $H_\theta$  и  $H_\varphi$  касательны к границе раздела и остаются непрерывными при ее переходе, поскольку  $|\epsilon_1| \gg 1$  в земле компоненты поля связаны соотношениями  $\epsilon_1^{1/2} E_\varphi = H_\theta$ ,  $\epsilon_1^{1/2} E_\theta = -H_\varphi$ , а компонента поля  $H_r$  остается малой как в волноводе, так и под землей. Затухание сигнала на дальних трассах для частоты излучения 100 Гц составляет несколько децибел на 1000 км, а максимальную амплитуду магнитной компоненты поля  $H_\varphi$  для источника от ГМД можно оценить как  $3,5 \cdot 10^{-7}$  А/м на расстоянии от источника около 3000 км. Поля от ГЭД слабее более чем на порядок. Отношение между лежащими в плоскости поверхности земли составляющими магнитного поля зависит от расстояния до источника и от высоты его расположения.

Глубина скин-слоя примерно соответствует длине волны радиоизлучения и существенно больше 100 м для рассматриваемого диапазона частот.

Из полученных оценок видно, что для подземных объектов, размеры которых существенно меньше длины волны проникшего под землю излучения, при решении задачи рассеяния воздействующее поле можно считать не зависящим от геометрических координат на границе этого объекта. Такое условие хорошо выполняется практически для любых типов грунтов (кроме морской воды) для длин волн зондирующего излучения порядка 100 Гц.

Алгоритм расчета полей над заглубленным объектом основывается на численном решении в декартовой системе координат уравнений Максвелла в неоднородной среде методом конечных разностей во временной области:

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma^* H_x &= -\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right) - K_x, & \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma^* H_y &= -\left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right) - K_y, \\ \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} + \sigma^* H_z &= -\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right) - K_z, & \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x &= \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) - J_x, \\ \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y &= \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right) - J_y, & \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z &= \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) - J_z \end{aligned} \quad (1)$$

Конечно-разностные аппроксимации уравнений (1) с расположением компонент электрического и магнитного полей относительно ячейки сетки показаны на рис. 2 и для компонент, например магнитного поля, имеют вид:

$$H_x^n(i, j, k) = a_m H_x^{n-1}(i, j, k) - \beta_m \left\{ K_x^{n-1} + \frac{E_z^{n-1}(i, j+1, k) - E_z^{n-1}(i, j, k)}{y_{j+1} - y_j} - \frac{E_y^{n-1}(i, j, k+1) - E_y^{n-1}(i, j, k)}{z_{k+1} - z_k} \right\},$$

$$H_y^n(i, j, k) = a_m H_y^{n-1}(i, j, k) - \beta_m \left\{ K_y^{n-1} + \frac{E_x^{n-1}(i, j, k+1) - E_x^{n-1}(i, j, k)}{z_{k+1} - z_k} - \frac{E_z^{n-1}(i+1, j, k) - E_z^{n-1}(i, j, k)}{x_{i+1} - x_i} \right\},$$

$$H_z^n(i, j, k) = a_m H_z^{n-1}(i, j, k) - \beta_m \left\{ K_z^{n-1} + \frac{E_y^{n-1}(i+1, j, k) - E_y^{n-1}(i, j, k)}{x_{i+1} - x_i} - \frac{E_x^{n-1}(i, j+1, k) - E_x^{n-1}(i, j, k)}{y_{j+1} - y_j} \right\},$$

где  $a_m, \beta_m$  – константы, определяемые магнитными параметрами среды:

$$a_m = (\mu / \Delta t - \sigma^* / 2) / (\mu / \Delta t + \sigma^* / 2),$$

$$\beta_m = (\mu / \Delta t + \sigma^* / 2)^{-1};$$

$(K_x^{n-1}, K_y^{n-1}, K_z^{n-1})$  – составляющие объемных плотностей магнитных токов задаются в требуемых местах  $H$ -составляющих.

В свободном пространстве  $\bar{J} = \bar{K} = 0$ ;  $\sigma = \sigma^* = 0$ ;  $a_m = 1$ ;  $\beta_m = \Delta t / \mu_0$ . Первичное падающее поле ионосферного источника моделируется введением в задачу составляющих объемных плотностей токов. Для обеспечения решения задачи в незамкнутом пространстве на границе счетного объема введено вспомогательное условие Мура I порядка, позволяющее досчитывать неизвестные граничные компоненты полей.

В качестве примера приведен расчет электромагнитных полей над шахтной пусковой установкой проекта «Двина», общий вид которой с характерными размерами показан на рис. 3, а соответствующая этому рисунку ячеечная структура – на рис. 4. Результаты расчета максимальной горизонтальной компоненты рассеянного магнитного поля, нормированной к амплитуде магнитного поля, формируемого в отсутствии заглубленного объекта, в плоскости, параллельной земле, на высотах 5 и 100 м показаны на рис. 5 и 6.

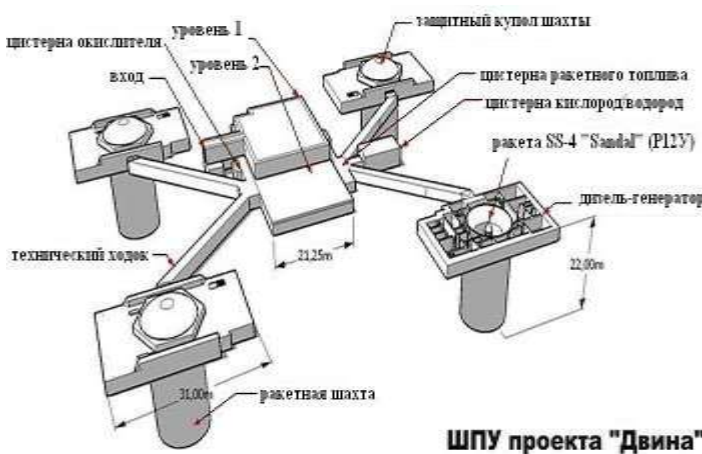


Рис. 3. Шахтная пусковая установка проекта «Двина»

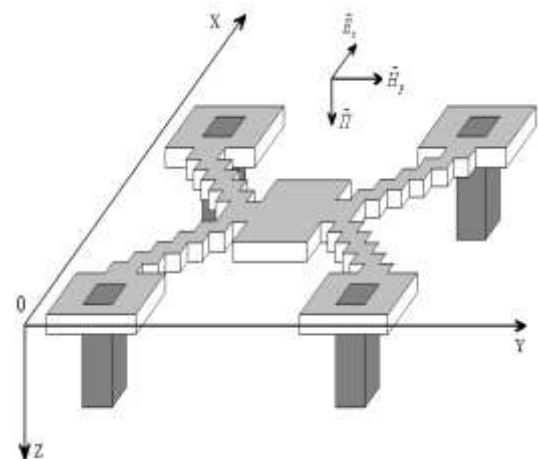
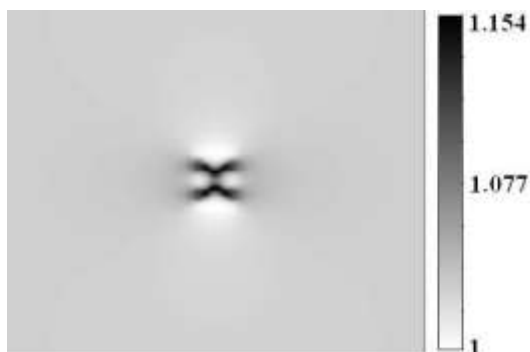


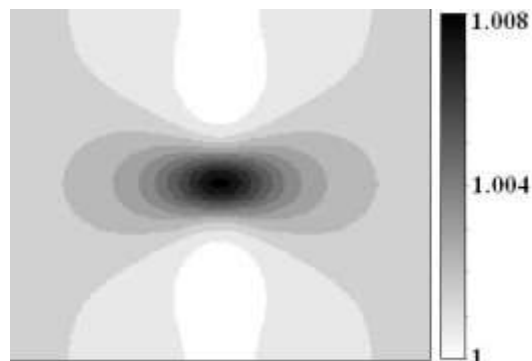
Рис. 4. Ячеечная модель пусковой установки «Двина»

Из результатов расчетов можно сделать вывод, что рассеянное поле в ближней от объекта зоне пропорционально значениям исходных полей и их объему. Для объекта с высокой проводимостью рассеянные поля обратно пропорциональны кубу расстояния до него. Из приведенных рисунков видно, что пространственный градиент дифрагированных полей даже на близких расстояниях к малоуглубленному объекту низок, что делает оперативный процесс

обнаружения даже малозаглубленных объектов с высоты порядка 100 м весьма затруднительным. В то же время на уровне поверхности земли указанный метод позволяет получить не очень четкую конфигурацию не глубоко залегающих подземных объектов, характеризующихся материалами с высокой проводимостью.



*Рис. 5. Распределение максимальной величины горизонтальной компоненты магнитного поля в плоскости, параллельной земле на высоте 5 м от расположения установки «Двина»*



*Рис. 6. Распределение максимальной величины горизонтальной компоненты магнитного поля в плоскости, параллельной земле на высоте 100 м от расположения установки «Двина»*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Техническая возможность регистрации рассеянного излучения на поверхности земли и в ее близи зависит от соотношения величины полученного и начального уровня сигналов в волноводе, а также от уровня естественных шумов. Обработка экспериментальных данных по регистрации шумов на частотах, больших  $\sim 1$  Гц [7] приводит к зависимости их интенсивности от частоты  $f$ , близкой к  $1/f^m$ , где  $m \sim 1 \div 2$ . Для оценки уровня естественного шума в волноводе Земля–ионосфера используется следующая модель спектра шумов:  $\langle V_{\text{шум}} \rangle = 0,5(10/f)^{1,2}$ , где  $\langle V_{\text{шум}} \rangle$  – среднеквадратичное отклонение естественных шумов для полосы приема шириной 1 Гц, пТл·Гц $^{-1/2}$ ;  $f$  – частота, Гц. Тогда для полосы приема 1 Гц в области 100 Гц уровень шумов будет примерно на порядок меньше, чем значения компоненты  $H_\varphi$  от излучения ГМД на расстоянии 3000 км. Для ионосферного ГЭД уровень шумов будет примерно в пять раз выше. В этом случае существенного увеличения возможности по обнаружению заглубленных объектов можно добиться использованием алгоритмов накопления полезного сигнала по времени, а также технологий, повышающих мощность ионосферного источника.

## Список используемых источников

1. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ диапазона / Е.П. Велихов, А.А. Жамалетдинов, Л.А. Собчаков и др. // ДАН Геофизика. – 1994. – Т. 338, № 1. – С. 106–109.
2. Tripathi V.E., Chang C.I., Popadopoulos K. Excitation of the earth-ionosphere waveguide by an RLF source in the ionosphere // Radio science. – 1982. – Vol. 17, № 5. – P. 1321–1326.
3. Котик Д.С., Поляков С.В., Яинов В.А. Возбуждение волновода Земля–ионосфера низкочастотными источниками, расположенными в неоднородной ионосфере // Радиофизика. – 1978. – Т. 21, №7. – С. 930.

4. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. – Киев: Наукова думка, 1977.
5. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. – М.: Наука, 1991.
6. Коберник Д.А., Никольский В.А., Руденко В.В. Особенности распространения низкочастотного радиосигнала в глубину подстилающей поверхности // Труды III конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т. 2. – С.89–94.
7. Lanzerotti L.J., MacLennan C.G., Fraser-Smith A.C. Background magnetic spectra:  $\sim 10^{-5}$  to  $\sim 10^5$  Hz // Geophys. Res. Letters. – 1990. – Vol. 17. – P. 1593–1596.



С. А. Кондратьев\*,

доктор физико-математических наук;

Д. М. Рыжиков\*\*;

А. С. Тимофеев\*\*;

Е. Ф. Чичкова\*\*,

кандидат географических наук

\* ФГБУН ИНОЗ РАН, г. Санкт-Петербург.

\*\* ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТИПОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ LANDSAT-8 НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРА РЕКИ НАРВЫ

В статье предложена методика идентификации типов подстилающей поверхности по спутниковым снимкам Landsat-8. Классификация подстилающей поверхности проведена на примере водосбора реки Нарвы по пиксельным и объектно-ориентированным методам с использованием метода спектральных преобразований и отношений. Для идентифицированных типов поверхностей водосбора рассчитаны площади. При помощи модели ILLM рассчитана биогенная нагрузка водосборной зоны реки Нарвы на Финский залив.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковые снимки, классификация, идентификация, водосборная зона, биогенная нагрузка.

Существующая система государственного мониторинга водных объектов характеризуется постоянным сокращением числа пунктов наземных наблюдений, сложностями с получением результатов натурных измерений и невысоким качеством получаемой информации. Как результат – острый дефицит исходных данных, необходимых для выполнения работ по моделированию природных систем. Спутниковая информация компенсирует указанный пробел в информационном обеспечении моделей [1], предоставляя также оперативность и периодичность получения данных, обзорность больших территорий, наглядность продуктов обработки данных.

Цель проводимого исследования – разработка методики идентификации типов подстилающей поверхности территорий по данным спутниковой съемки для последующей оценки биогенной нагрузки на водные объекты.

Основной прикладной задачей данной работы являлся расчет биогенной нагрузки, сформированной на выбранном объекте по рассчитанным площадям определенных типов поверхности.

В качестве объекта настоящего исследования была выбрана водосборная территория р. Нарвы, расположенная в пограничном с Эстонией районе и представляющая интерес в качестве источника поступления биогенных веществ в Финский залив, вызывающих его интенсивное эвтрофирование и ухудшение качества воды.

Основой для выполнения расчетов биогенной нагрузки на Финский залив, сформированной на водосборе р. Нарвы, послужила модель ILLM – *Institute of Limnology Load Model* (свидетельство о гос. регистрации № 2014612519 от 27.02.2014), разработанная в Институте озераведения РАН [2] и предназначенная для расчета внешней нагрузки общим азотом и общим фосфором на водные объекты со стороны водосбора. Модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах в Северо-Западном регионе России. Модель верифицирована на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России: водосборах рек Нева, Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка.

Согласно модели рассредоточенная нагрузка общим фосфором  $P_{\text{общ}}$  и общим азотом  $N_{\text{общ}}$  от естественных и антропогенных ландшафтов  $L$  [т/год] формируется за счет эмиссии биогенных веществ из почв, слагающих водосбор. Расчетная зависимость имеет следующий вид:

$$L = \sum_j \frac{C_j y_j A_j}{1000}, \quad (1)$$

где  $C_j$  – средние концентрации биогенного вещества в стоке с  $j$ -го типа подстилающей поверхности, мг/дм<sup>3</sup> = г/м<sup>3</sup>;

$y_j$  – слой стока с рассматриваемых типов подстилающей поверхности, мм/год;

$A_j$  – площади рассматриваемых типов подстилающей поверхности, км<sup>2</sup>, определяемые на основе космической съемки.

Типы подстилающей поверхности для водосбора Нарвы распознавались по пяти заданным категориям подстилающей поверхности: леса; поля; луга; болота; урбанизированные зоны, свалки и неиспользуемые земли. Идентификация подстилающей поверхности по заданным категориям – это многоэтапный процесс. Схема методики идентификации, разработанной для решения поставленной задачи, показана на рис. 1.

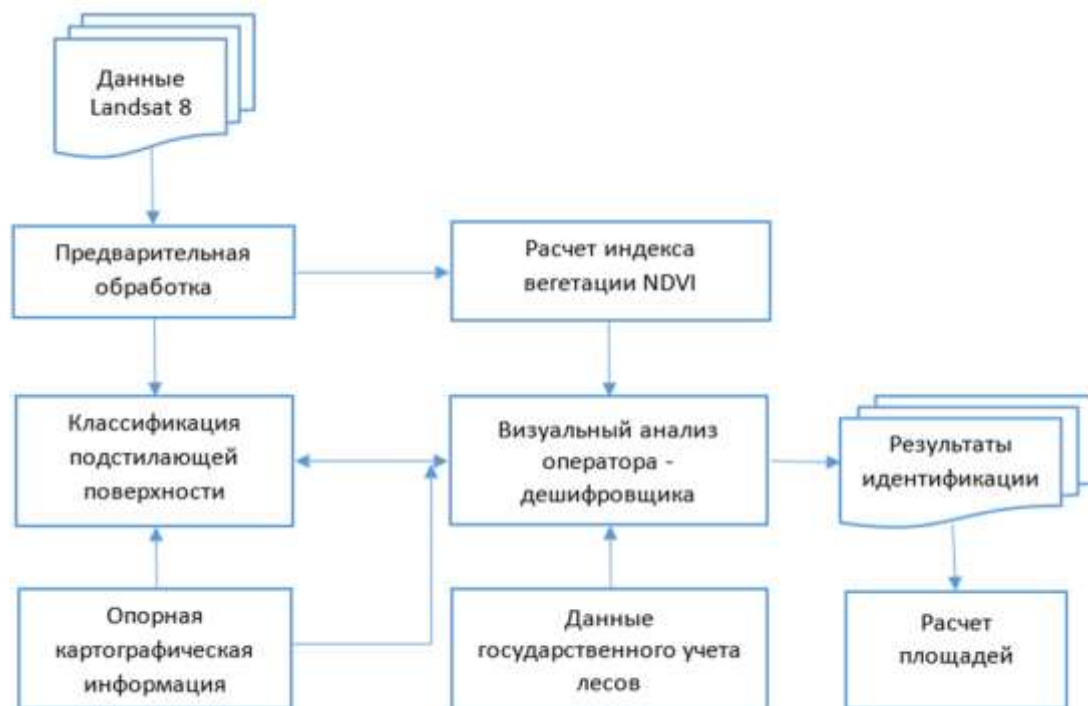


Рис. 1. Схема методики идентификации типов подстилающей поверхности

В качестве исходной информации использовались многоспектральные данные американского космического аппарата (КА) Landsat-8 среднего пространственного разрешения съемки (30 м) в семи каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов от 0,433 до 2,300 мкм и в канале качества Quality Assessment (QA). Данные за две даты: 11.07.2014 и 17.08.2015 были получены с сервиса Геологической службы США USGS [4].

Обработка космической информации включала два основных этапа: предварительную обработку и тематическую. Предварительная обработка состояла из первичной обработки данных (геометрической коррекции, калибровки) и из процедуры создания облачной маски. Облачная маска снимков космического аппарата Landsat-8 формировалась путем работы с каналом качества QA. Пиксели, соответствующие облачности по определенным цифровым зна-

чениям в QA, исключались из процесса классификации и автоматически добавлялись к классу «Облачность».

Тематическая обработка сводилась к поиску на водосборе участков изображений подстилающей поверхности заданных категорий (целевых классов) площадных объектов и выполнялась с применением следующих методов обработки спутниковых снимков:

- 1) визуального дешифрирования (поиск объектов интереса на снимках без применения программных алгоритмов);
- 2) спектральных преобразований и отношений (расчет индексов вегетации);
- 3) классификации (отнесение изображенных на снимке пикселей к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих объекты подстилающей поверхности).

В качестве методов классификации использовались расстояние Махаланобиса и метод максимального правдоподобия. Расстояние Махаланобиса рассчитывается по следующей формуле:

$$D_m = \sqrt{(x - \mu)^T S^{-1} (x - \mu)}, \quad (2)$$

где  $x$  – вектор значений пикселей снимка;

$\mu$  – вектор средних значений эталонной выборки,

$S$  – матрица ковариации, и в отличие от метода минимальных расстояний учитывает разброс значений эталонной выборки.

Оценка максимального правдоподобия рассчитывается по следующей формуле:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} f(X, \theta), \quad (3)$$

где  $f(X, \theta)$  – функция правдоподобия, которая достигает максимума (как функция от  $\theta$  при фиксированных значениях эталонной выборки  $X_1, \dots, X_n$ ). Выбранные подходы классификации относятся к классу методов попиксельного анализа.

В статье применялась классификация с обучением, заключающаяся в создании экспертом-дешифровщиком спектральных эталонов для различных классов объектов [3]. Для решения поставленной задачи использовался программный комплекс ERDAS Imagine Professional.

При проведении данной работы выявлены следующие особенности идентификации типов заданных поверхностей в водосборе Нарвы по данным КА Landsat-8:

1) по данным канала QA оптически не плотные облака и тени от облаков не идентифицируются. Требуется дополнительная тематическая обработка данных при наличии облачности на снимках;

2) проблемными для автоматического распознавания являются загрязненные взвешенными веществами водоемы, которые идентифицируются как урбанизированные зоны;

3) среднее пространственное разрешение (30 м) недостаточно для определения типов лесов (хвойные или лиственные), а также отделения свалок, карьеров от урбанизированных зон по спутниковой информации;

4) привлечение вспомогательной информации в виде лесоустроительных карт помогает определиться с типом растительности, но часто контуры лесов не совпадают. Данные на картах не актуальны: нет свежих вырубок, процент лесистости территории завышен;

5) такие типы подстилающих поверхностей, как поля и луга отличаются друг от друга по значениям индекса вегетации и по геометрии полей. В случаях обнаружения вырубок леса с сухим травянистым покровом они отнесены к типу «Луга»;

6) тип «Болота» достаточно точно идентифицируется используемыми методами автоматической классификации с добавлением к нему типа поверхности – «Переувлажненные вырубки леса».

По результатам тематической обработки были построены тематические карты, отображающие пространственное распределение целевых классов объектов, а далее был проведен визуальный анализ в соответствии с поставленной задачей. После анализа с привлечением вспомогательной информации вносились поправки и строились результирующие карты идентификации заданных типов подстилающей поверхности водосбора (рис. 2).

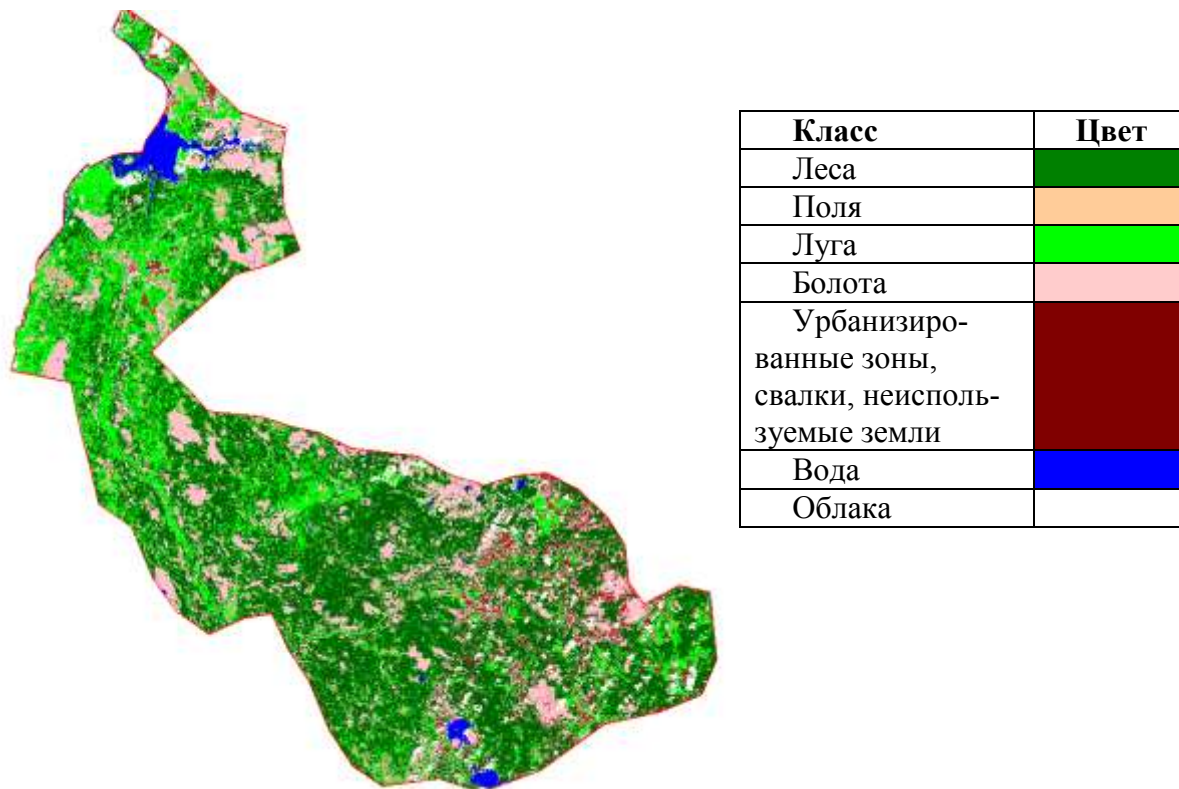


Рис. 2. Типы подстилающих поверхностей водосбора реки Нарвы

В итоге были попиксельно рассчитаны площади для всех идентифицированных типов подстилающей поверхности в пределах водосбора р. Нарвы (табл. 1).

Таблица 1

**Распределение площадей по типам подстилающих поверхностей для территории водосбора реки Нарвы**

Площадь, км <sup>2</sup>						
Леса	Поля	Луга	Болота	Урбанизированные зоны, свалки, неиспользуемые территории	Водные объекты	Суммарная
2588,5	400,2	1191,5	1002,2	192,1	109,2	5483,7

Расчитанные значения площадей различных типов поверхностей для водосбора р. Нарвы использовались как входные параметры для расчета биогенной нагрузки, сформированной на этой территории, по математической модели *ILLM*. Результаты расчетов по модели *ILLM* показали, что в современных условиях рассредоточенная биогенная нагрузка на Финский залив со стороны водосбора р. Нарвы оценивается в 78,3 т/год общим фосфором и 1582,8 т/год общим азотом. Ее фоновые составляющие (т. е. без учета антропогенного вклада) – 48,5 т/год ( $P_{\text{общ}}$ ) и 1677,0 т/год ( $N_{\text{общ}}$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод идентификации подстилающих поверхностей позволил выделить по отдельным данным космической съемки Landsat-8 за 2014–2015 годы шесть типов значимых поверхностей на Российской территории водосбора реки Нарвы. Для каждого типа поверхности были рассчитаны площади в пределах данного водосбора.

Проведенные расчеты рассредоточенной биогенной нагрузки (фосфор и азот) по модели *ILLM* на Финский залив со стороны водосбора р. Нарвы позволили произвести оценку в сравнении с фоновыми значениями.

Полученная оценка биогенной нагрузки будет использована для расчетов суммарной нагрузки на Финский залив с Российской части водосбора и оценки перспектив ее снижения в соответствии с международными обязательствами РФ в рамках проекта «Научно-обоснованные предложения по установлению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России и определение соответствия нагрузки требованиям Копенгагенской Министерской Декларации ХЕЛКОМ (2013)».

Перспективы развития методов количественной оценки выноса биогенных веществ с водосбора связаны прежде всего с организацией использования данных как контактных методов, так и методов дистанционного зондирования с выходом на прогноз в системе комплексного мониторинга.

## Список используемых источников

1. Основы методики контроля над объектами накопленного экологического ущерба / В.А. Румянцев, Ш.Р. Поздняков, Е.Ф. Чичкова, В.И. Уличев // Перспективные направления развития науки в Петербурге. – СПб.: Изд-во ИП Пермяков, 2015. – Разд. 6.1. – С. 253–265.
2. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты / С.А. Кондратьев, М.В. Казмина, М.В. Шмакова, Е.Г. Маркова // Региональная экология. – 2011. – № 3-4. – С. 50–59.
3. Рыжиков Д.М. Автоматизация дешифрирования космических снимков по эталонному спектральному образу лиственного леса // Сборник докладов научной сессии ГУАП. – СПб.: Технические науки, 2015. – Ч. II. – С. 292–297.
4. URL: [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php) (дата обращения: 26.05.2016).

В.М. Петроченко,  
кандидат техн. наук;  
В.Н. Шулейкин\*,  
доктор физико-математических наук;  
Г.Г. Щукин,  
доктор физико-математических наук, профессор  
\* Институт проблем нефти и газа.

## АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОИСК ПОДЗЕМНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Повышенный сток водорода и метана по тектоническим разломам, карстовым полостям приводит к росту эксхалации радона. Рост эксхалации радона приводит к росту полярных проводимостей воздуха и спаду атмосферного электрического поля. Наблюдаемые эффекты можно использовать для картирования подземных инженерных сооружений с поверхности Земли.

Ключевые слова: водород, метан, радон, полярные проводимости воздуха, атмосферное электрическое поле, подземное инженерное сооружение.

### ВВЕДЕНИЕ

Установлено, что существует жесткая связь между водородом, метаном, радоном почвенного воздуха и элементами приземного атмосферного электричества. Пузырьковые образования летучих газов захватывают с глубин 4–6 м почвенный радон, выносят его в приземную атмосферу, где он является единственным естественным ионизатором воздуха [1–3] (рис. 1).

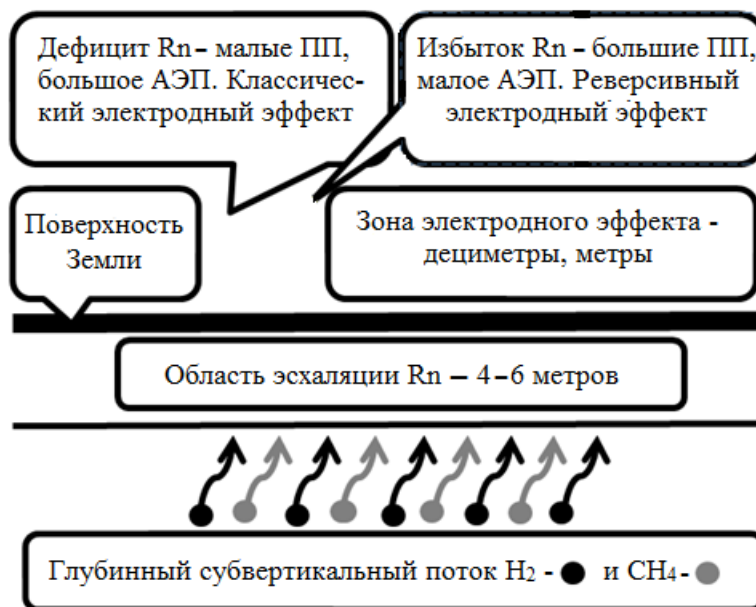


Рис. 1. Схема связей водорода, метана, радона и элементов приземного атмосферного электричества

При дефиците ионизатора (малой газопроницаемости) наблюдается классический электродный эффект: малые полярные проводимости (ПП) и высокие значения атмосферного электрического поля (АЭП). При избытке ионизатора (большой газопроницаемости) имеет место реверсивный электродный эффект: высокие ПП и малые АЭП. Увеличение газопрони-

цаемости, в том числе и приповерхностных слоев грунта, приведет к росту эксхалляции радона: к росту ПП приземного воздуха и спаду АЭП.

Соотношение концентраций радона грунта и радона атмосферы 100:1 и даже больше. Другими словами, 1% от концентрации радона грунта обеспечивает в атмосфере нормальные фоновые значения АЭП и ПП. Процесс регистрации радона составляет 6–10 мин с ошибкой после усреднения ~ 17%. Поле и проводимости регистрируются мгновенно с 3-кратным увеличением точности. Таким образом, элементы приземного атмосферного электричества крайне чувствительны к изменениям плотности потока водорода и метана.

В нашей стране многие десятилетия велись непрерывные режимные наблюдения АЭП и ПП. Самыми популярными измерительными инструментами для регистрации этих параметров являются датчики «Поле-2» и блок аспирационных конденсаторов «Гардиена». Эти приборы и использовались во всех описанных ниже экспериментальных исследованиях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НАД РАЗЛОМАМИ И КАРСТОВЫМИ ПОЛОСТЯМИ

Первое экспериментальное подтверждение избыточной эксхалляции радона и спада АЭП было получено в сейсмоактивном регионе (в Дагестане), в разломной зоне реки Акташ. На рис. 2 представлены копии записей трех последовательных АЭП-профилирований на 19 км трассы Хасавьюрт – Дылым.

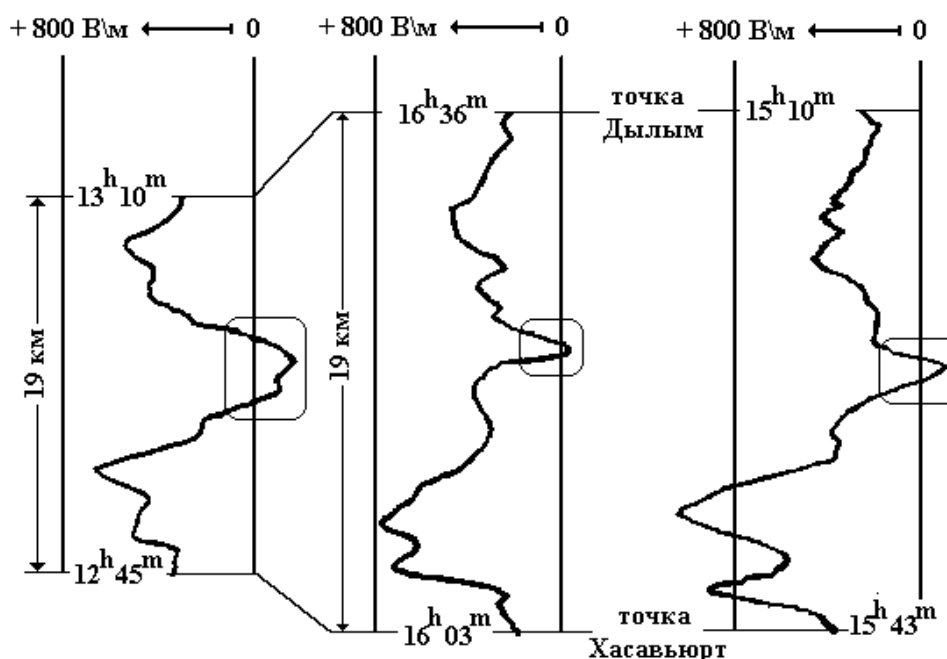


Рис. 2. Результаты АЭП-профилирования разломной зоны реки Акташ, Дагестан. Отрицательные значения поля – пересечение разлома

Аномальный вынос ионизатора на километровой отрезке в центре профиля приводит к отрицательным значениям АЭП – ярко выраженному реверсивному электродному эффекту [4]. Тот же эффект наблюдался и на профиле, проходящем через Александровский разлом, Белоруссия. Фоновый уровень поля на бортах разлома ~ 350÷360 В/м; АЭП над разломом ~ 150В/м. Объемная активность радона и содержание водорода почвенного воздуха над разломом оказались в два раза выше.

Серия атмосферно-электрических и радоновых наблюдений была проведена на Калужской кольцевой структуре, где бурением выделено три системы кольцевых разломов диамет-

ром 12–14 км, 22–26 км и 36–40 км. Непрерывные измерения АЭП на 23-километровом профиле показали наличие спада поля до величины  $E = 90 \div 95$  В/м на пересечении с первым кольцевым разломом при фоновом уровне сигнала  $E \sim 180$  В/м.

Близкий результат был получен при работах на профиле общей длиной 13,7 км, где электроразведка зарегистрировала резкое понижение кровли фундамента – резкое увеличение толщи осадочных пород (рис. 3).

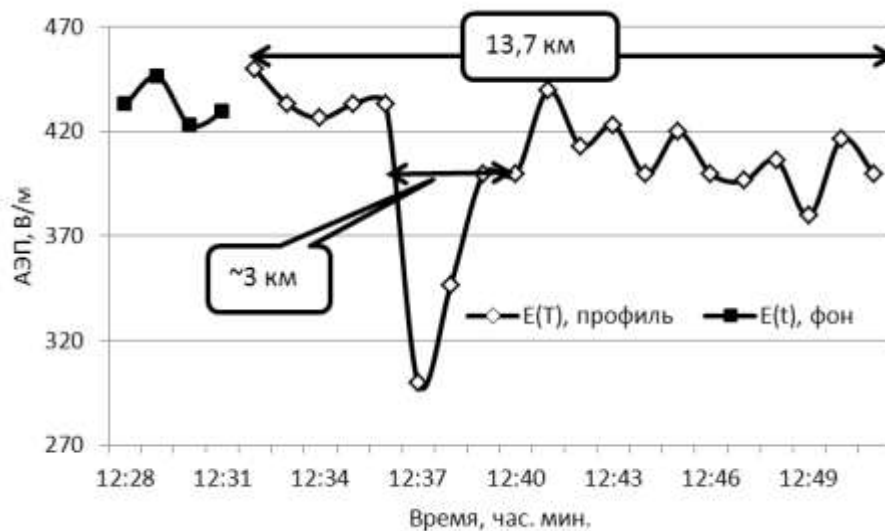


Рис. 3. Вариации АЭП над областью резкого понижения кровли фундамента – увеличения мощности осадочных пород

Первые четыре точки на графике – фоновая запись АЭП перед началом профильных работ. Последующие 19 мин записи – данные изменений АЭП на профиле общей длиной 13,7 км. После прохода временной отметки  $12^{\text{h}} 36^{\text{m}}$  наблюдается резкий спад сигнала на 133 В/м, который восстанавливается в  $12^{\text{h}} 40^{\text{m}}$ . В указанный временной интервал профиль проходит отрезок равный 3 км над областью резкого увеличения мощности осадочных пород, газопроницаемость которых существенно выше, чем у коренных.

На урбанизированных территориях наблюдения АЭП не имеют смысла – поле экранируется постройками, ЛЭП, зелеными насаждениями. Здесь измерения проводились с использованием датчика ПП воздуха – блоком аспирационных конденсаторов. Наблюдения проводились в г. Туле в Союзном переулке над карстовой полостью, которая уверенно прослеживалась по трещинам в стенах домов. Наблюдательный профиль шел в обхват дома – имел подковообразную форму, что позволило пересечь карстовую полость два раза (рис. 4). Из графика видно, что профиль пересекает карстовую полость на отметках 4 и 67 м.

Несмотря на то, что в ходе эксперимента удалось наблюдать только положительную ПП (усилитель отрицательной ПП вышел из строя), максимумы сигнала при пересечении карста достаточно контрастны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НАД ПОДЗЕМНЫМИ ИНЖЕНЕРНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

На рис. 5 показаны результаты наблюдений ПП на профиле, пересекающем линию метро мелкого заложения – 6–8 м относительно поверхности земли (окрестности станции метро Коньково). На рис. 5 обращает на себя внимание наличие дополнительного максимума на графиках.



На рис. 6 изображена схема обтекания подземной полости субвертикальным потоком летучих газов, в том числе водородом и метаном. Плотность воздушного потока достигает максимума над полостью; следующий максимум наступает на расстоянии, сравнимом с глубиной полости.

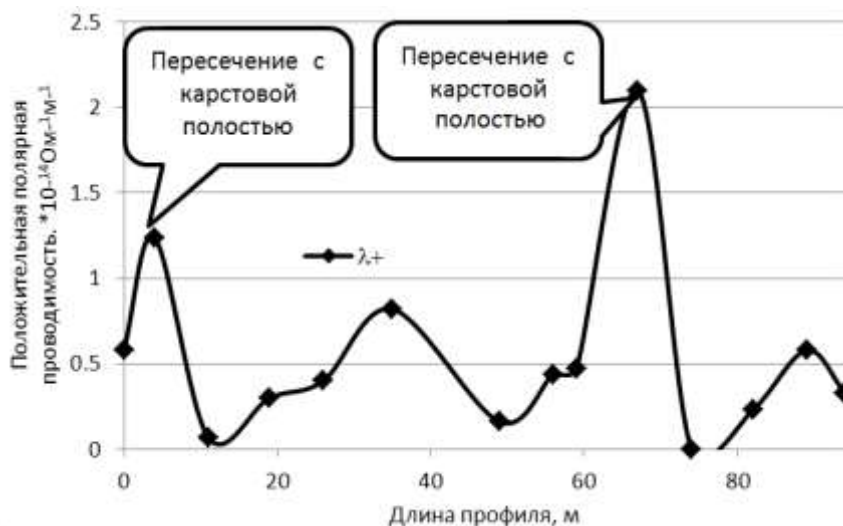


Рис. 4. Вариации положительной ПП воздуха на подковообразном профиле, дважды пересекающем карстовую полость

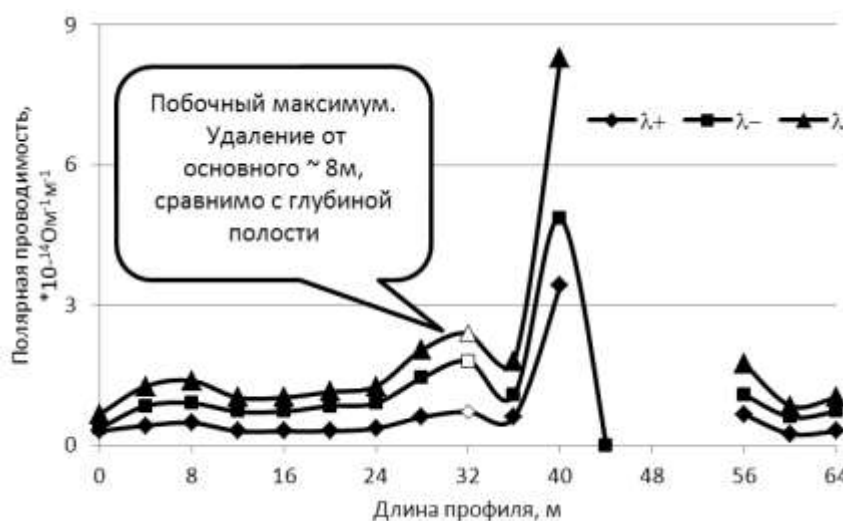


Рис. 5. Вариации полярных проводимостей воздуха, зарегистрированные на профиле, пересекающем линию метро мелкого заложения – 6–8 м

Эксперимент повторялся над линией метрополитена глубокого заложения  $\sim 25 \div 30$  м (рис. 7). Над линией метро (отметка 24), суммарная полярная проводимость превышает уровень сигнала на отметке 0 в 2,4 раза. Более того, на отметке 48 просматривается побочный максимум, на удалении от основного (отметка 24) на 24 м.

На пикете 0 зарегистрированы самые низкие значения ПП, хотя по логике изложения здесь следовало ожидать появление еще одного побочного максимума. Причина наблюдаемых противоречий лежит в месте расположения пикета – на расстоянии нескольких метров от перекрестка, на котором с утра до вечера стоят десятки машин. Техногенное сейсмическое возбуждение от работающих двигателей обедняет содержание радона грунта и, соответственно, приводит к малым ПП.

Аналогичный эффект наблюдался при контроле АЭП над зоной гидроразрыва [3]. Сейсмическое и деформационное воздействие гидроразрыва приводило к мощному импульсному выбросу радона в атмосферу, что на многие часы уменьшало эксхалляцию ионизатора в атмосферу.

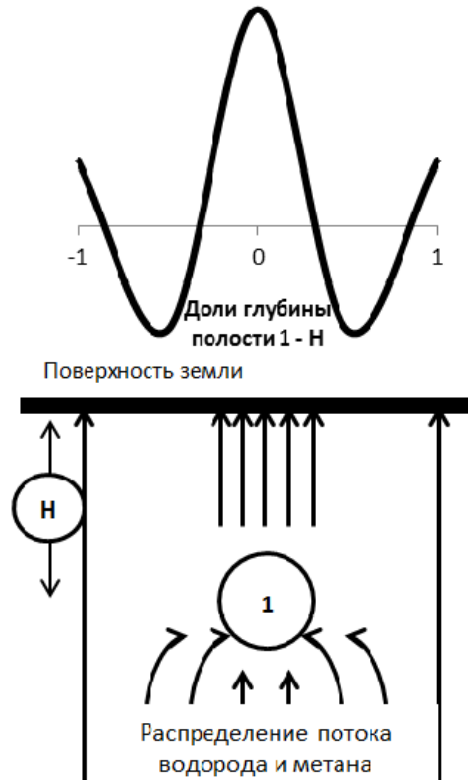


Рис. 6. Схема перераспределения воздушного потока почвенного воздуха под подземной полостью и над ней (1). Средняя глубина полости (H)

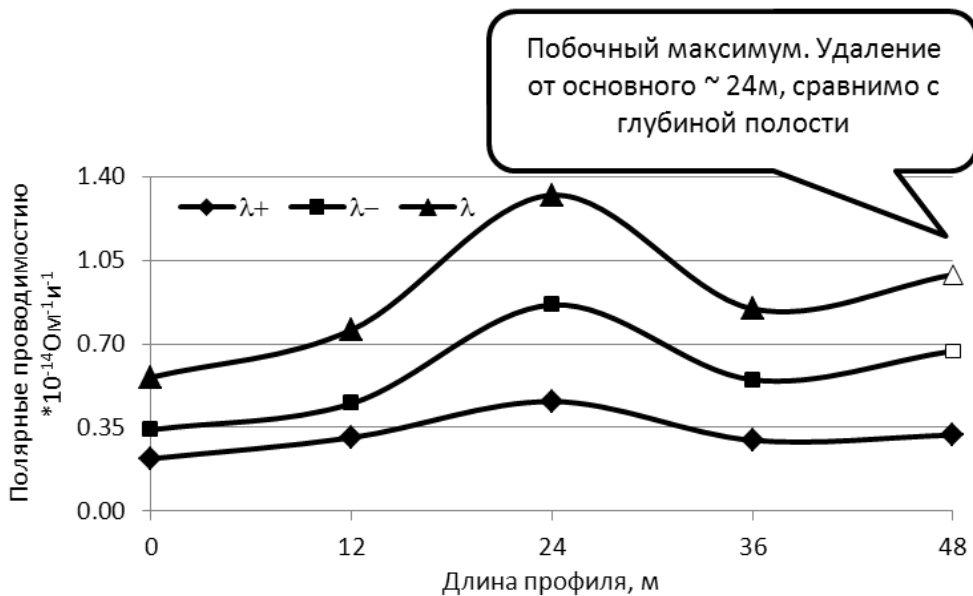


Рис. 7. Вариации полярных проводимостей воздуха, зарегистрированные на профиле, пересекающем линию метро глубокого заложения – 25–30 м

Дополнительно к профильным наблюдениям на отметке 24 непосредственно над шахтой метро была сделана 10-минутная временная запись положительной и отрицательной ПП (рис. 8).

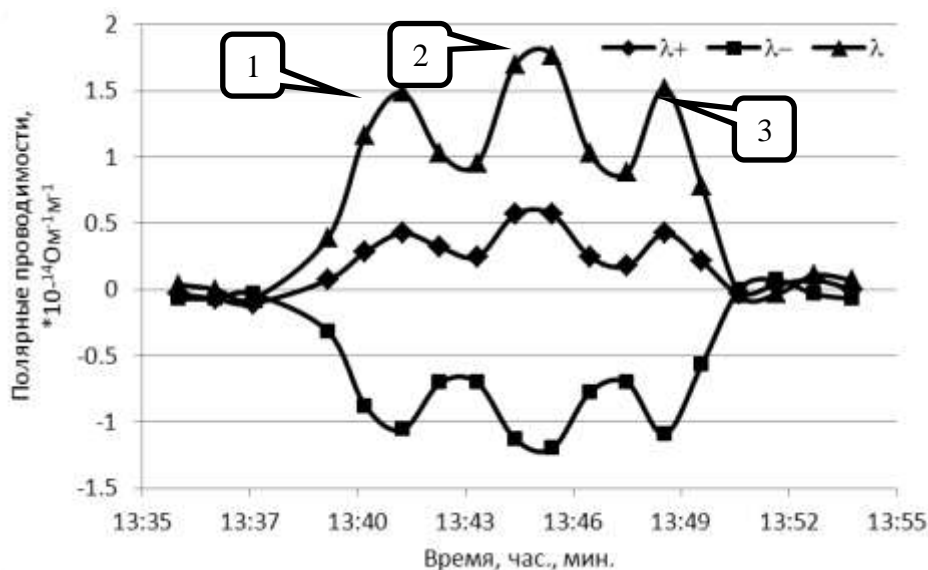


Рис. 8. Временные вариации положительной и отрицательной ПП над линией метро глубокого заложения. Интервалы  $13^{\text{h}}35^{\text{m}} - 13^{\text{h}}39^{\text{m}}$  и  $13^{\text{h}}50^{\text{m}} - 13^{\text{h}}54^{\text{m}}$  – записи нулевого уровня сигналов аспирационных конденсаторов. Марки 1–3 – проход поездов метро под наблюдательным пикетом

Техногенное сейсмическое воздействие, вызванное прохождением поезда, заметно повышает уровень сигнала, особенно по каналу отрицательной ПП [5].

На заключительном этапе работ были проведены контрольные наблюдения ПП над подземным инженерным сооружением, заложенным на глубине  $\sim 55$  м относительно поверхности земли. Превышение суммарной полярной проводимости в зоне проекции искусственной полости на поверхность относительно фона составило величину  $1,5 \div 1,7$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подземное инженерное сооружение становится областью стока летучих газов с площади, существенно превышающей площадь искусственной полости. Дальнейший их подъем пойдет исключительно с площади полости, что приведет к увеличению плотности водорода и метана, повышению уровня эксхалации радона, росту ПП и спаду АЭП в зоне проекции подземного инженерного сооружения на поверхность земли.

Эксперименты над подземными инженерными сооружениями – складскими помещениями, шахтными сооружениями – показали возможность их обнаружения до глубин  $30 \div 50$  м. На открытых территориях эффективно использовать наблюдения атмосферного электрического поля с борта автотранспортного средства.

На урбанизированных территориях следует использовать измерения полярных проводимостей воздуха. Запись сигнала дискретна от пикета к пикету. Для повышения чувствительности метода и его помехозащищенности от наводок метеорологической природы целесообразно вести наблюдения полярных проводимостей не атмосферного, а почвенного воздуха.

**Список используемых источников**

1. *Баранов В.И.* Радиометрия. – М.: Издательство АН СССР, 1956. – 343 с.
2. *Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г.* Атмосферное электричество и микроколебания земли // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 12. – С. 38–46.
3. *Редин А.А.* Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы: автореферат кандидатской диссертации. – Таганрог, 2011. – 19 с.
4. *Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В.* Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. – СПб.: ЦОП РГГМУ, 2015. – 205 с.
5. *Тверской П.Н.* Курс метеорологии. – Л.: Гидрометиздат, 1951. – 887 с.

И.В. Самохвалов,  
доктор физико-математических наук, профессор  
Томский государственный университет, г. Томск

## ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Обсуждаются результаты исследования микроструктуры перистых облаков поляризационным лидаром. Оценивается влияние метеопараметров на образование ансамблей ориентированных частиц. Показано, что комплексные исследования облаков лидаром и многоканальным спутниковым радиометром MODIS позволят создать методику обнаружения из космоса облачных полей, состоящих из преимущественно ориентированных частиц льда.

Ключевые слова: перистые облака, матрица обратного рассеяния, вектор Стокса, степень ориентации кристаллов льда, лидарно-радиометрический метод распознавания облаков, поляризационный лидар.

### ВВЕДЕНИЕ

Определяющим источником погрешностей в расчетах радиационного баланса атмосферы является несовершенство оптических моделей облаков верхнего яруса (ОВЯ), в которых не учитывается свойство *ориентированности несферических облачных частиц* – кристаллов льда. Сложившаяся ситуация легко объясняется тем фактом, что нет микрофизической модели, адекватно описывающей реальное облако с преимущественной ориентацией кристаллов льда, так как до сих пор нет инструментальных методов определения ориентации ансамблей несферических частиц в перистых облаках.

Ранее в работах [1, 2] было показано, что по матрице обратного рассеяния света (МОРС) можно оценить состояние ориентированности кристаллических частиц льда в ОВЯ. Однако полную МОРС перистых облаков можно определить только над точкой расположения лидара. В связи с этим возникает вопрос: возможно ли найти способ распознавания ОВЯ с преимущественно ориентированными частицами льда по снимкам облачных полей из космоса с помощью аппаратуры, устанавливаемой на метеорологических спутниках. Обсуждению этой проблемы и посвящена настоящая статья.

### ОБНАРУЖЕНИЕ ПОЛЕЙ ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ЛЬДА В ПЕРИСТЫХ ОБЛАКАХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЛИДАРА

В качестве иллюстрации возможностей применения поляризационного лидара для диагностики микроструктуры ОВЯ рассмотрим эксперимент от 04.02.2015. Для определения 16 элементов МОРС передатчик лидара посылает в атмосферу излучение с длиной волны 0,53 мкм с четырьмя состояниями поляризации, характеризующимися нормированным вектором Стокса  $S_n$  [2]. В приемном канале лидара установлены поляризационные элементы, которые образуют поляриметр, последовательно реализующий четыре приборных вектора  $G_m$  ( $n, m$  принимают значения 1–4). При четырех комбинациях вектора Стокса передатчика и четырех состояниях приборного вектора измеряется 16 интенсивностей рассеянного назад излучения, что позволяет вычислить 16 элементов МОРС. Продолжительность измерения составляет 6–14 мин (при накоплении по 200–500 импульсов лазера, с частотой 10 Гц). На рис. 1 приведены 16 лидарных сигналов, необходимых для вычисления МОРС.

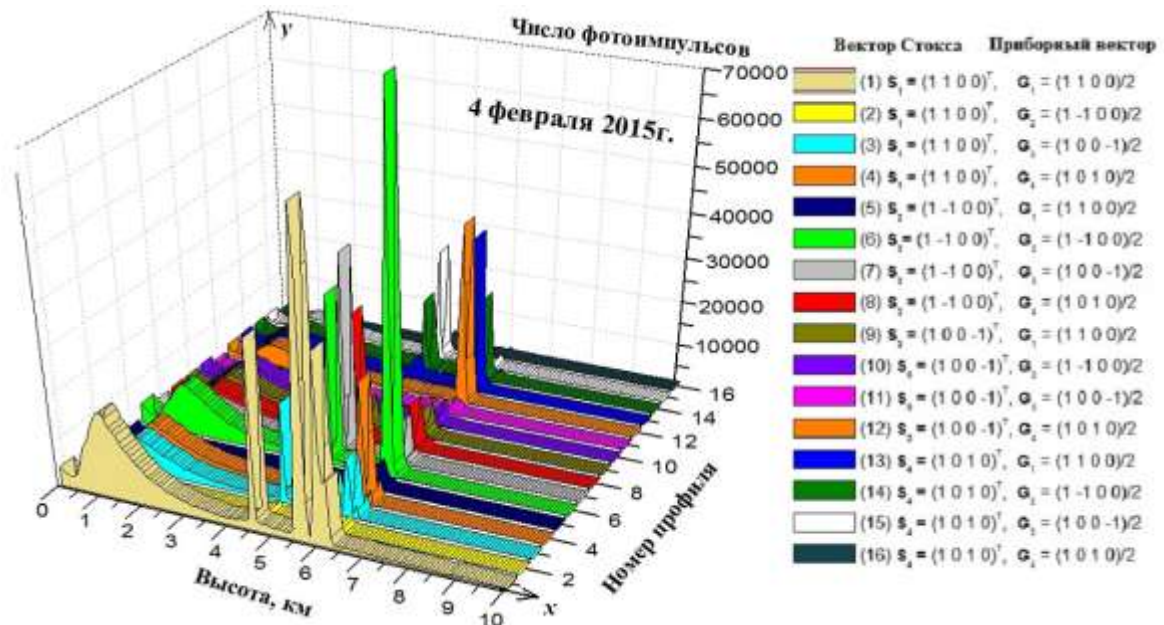


Рис. 1. Вертикальные профили интенсивности обратно рассеянного излучения

По оси  $x$  отложена высота в километрах, по оси  $y$  – суммарное количество одноэлектронных импульсов, приходящих с соответствующей высоты и накопленных системой регистрации. Справа на рисунке приведено пояснение к каждому профилю:  $S_i$  – нормированный вектор Стокса, описывающий состояние поляризации зондирующего излучения;  $G_j$  – приборный вектор приемной системы лидара, характеризующий совокупное действие поляризационных приборов в приемном канале.

Из рисунка следует, что на высотах 4,5 и 5,5–6,0 км наблюдаются облачные образования. Нижний слой на высоте 4,5 км характеризуется отношением рассеяния  $R(4,57 \text{ км})=21$  и оптической толщиной  $\tau_1=0,11$ , верхний (на высоте 5,5–6,0 км) – отношением рассеяния  $R(5,62 \text{ км})=48$  и оптической толщиной  $\tau_2=0,28$ . Степень поляризации лидарного сигнала близка к единице  $p=0,97 \div 0,99$ . МОРС имеет диагональный вид с элементами главной диагонали по модулю, близкими к 1, а недиагональные элементы (в пределах погрешности) близки к 0:

$$M_{\pi}(5,7 \text{ км}) = \begin{bmatrix} 1 & 0,00 & -0,04 & 0,05 \\ 0,00 & 0,99 & 0,06 & -0,06 \\ 0,04 & 0,06 & -0,96 & -0,02 \\ 0,05 & 0,01 & 0,04 & -0,94 \end{bmatrix}.$$

Элемент  $m_{44}$  является параметром, характеризующим полярную ориентацию, независимо от наличия или отсутствия азимутальной ориентации [3]. В эксперименте 04.02.2015 значение элемента  $m_{44}$  составляло  $-0,94$ , что относится к случаю с сильной ориентацией кристаллов в горизонтальной плоскости, когда до 90 % частиц больших диаметров отклонены от горизонтального положения на угол не более  $10^\circ$  [4].

Высокие значения степени поляризации, а также диагональный вид МОРС позволяют предположить, что облако содержит сильно ориентированные в горизонтальной плоскости частицы, имеющие плоские геометрические грани.

Для анализа метеорологической ситуации на высоте наблюдаемой облачности привлечена информация о метеопараметрах, представленная на сайте Вайомингского университета США [5]. Были выбраны наиболее близко расположенные к Томску станции измерений, находящиеся в г. Колпашево и г. Новосибирске.

По данным измерений в Колпашево 4 февраля 2015 года метеорологическая обстановка на высотах 4–6 км была благоприятна для образования кристаллических частиц. Относительная

влажность составляла 63–71 %, разница между температурой и точкой росы – около 2–5° при западном направлении ветра. К моменту эксперимента по лазерному зондированию в атмосфере на высотах 4–6 км над Томском сложилась ситуация, благоприятная для наблюдения облаков, содержащих преимущественно ориентированные кристаллические частицы.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО РАДИОМЕТРА

Методы регистрации облачности по спутниковым измерениям основаны на том факте, что облака имеют более высокую отражательную способность и более низкую температуру по сравнению с поверхностью Земли. Поэтому возможно определение наличия облачности на основе пороговых тестов в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах из космоса [6].

Анализ данных, поступающих с американских спутников TERRA и AQUA [6], показывает, что 26-й спектральный канал (длина волны  $\lambda = 1,38$  мкм) радиометра «MODIS» (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) при дневных условиях наблюдений позволяет осуществлять детектирование перистой облачности. Поскольку в области  $\lambda = 1,38$  мкм расположена сильная полоса поглощения водяного пара, отраженное от поверхности Земли солнечное излучение (при влагосодержании воздуха  $W > 1\text{г/см}^2$ ) поглощается нижними слоями атмосферы. Радиометр в 26-м канале фиксирует рассеянное излучение от перистой облачности или от слоев аэрозоля, расположенных в верхних слоях атмосферы. Используя пороговое значение коэффициента отражения  $R_{1,38}$  системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в канале  $\lambda = 1,38$  мкм на уровне (0,03–0,04), можно разделить оптические ситуации: безоблачная атмосфера; наличие перистой облачности и наличие плотной облачности с оптической толщиной  $\tau > 0,5$ .

В качестве примера рассмотрим результаты обработки массива спутниковых данных, полученных в дневное время суток для окрестности г. Томска 30 и 31 мая 2011 г. и сопоставим с данными лазерного зондирования ОБЯ [7]. Обработка спутниковых данных проведена С.В. Афониним по методикам, описанным в его диссертации [8], а результаты были им любезно предоставлены для сопоставления с данными лазерного зондирования.

В табл. 1 приведены характеристики облачности по данным MODIS в окрестности Томска за период с 30 по 31 мая 2011 года: процентное соотношение  $N_p$  капель и кристаллов в облаке; эффективные размеры частиц в облаке  $r_{ef}$ ; величина коэффициента отражения  $R_{1,38}$  в канале  $\lambda=1,38$  мкм.

Таблица 1

#### Характеристики облачности по данным MODIS

Дата	Время	$N_p$ , %		$r_{ef}$ , мкм		$R_{1,38}$	
		капли	лед	капли	лед	капли	лед
30.05.2011	12:40	40,1	59,9	10,0	25,0	0,041	0,078
30.05.2011	12:50	41,7	58,3	11,1	25,8	0,045	0,126
30.05.2011	14:25	44,5	55,5	9,1	29,2	0,035	0,125
31.05.2011	11:45	22,3	77,7	0,0	20,4	0,038	0,062
31.05.2011	13:20	84,6	15,4	0,0	0,0	0,034	0,026
31.05.2011	13:30	50,0	50,0	0,0	31,7	0,040	0,031
31.05.2011	15:10	100,0	0,0	0,0	0,0	0,039	0,000

Из таблицы следует, что 30 мая наблюдались повышенные значения  $R_{1,38} > 0,075$ . Как уже говорилось, это является одним из признаков присутствия в ОБЯ кристаллов льда. Максимальное процентное соотношение  $N_p > 70\%$  для кристаллов льда было зафиксировано 31 мая.

Остановимся на качественном описании динамики изменения параметров ОБЯ по лидарным данным во время пролета спутника.

30 мая. На высоте 5,85 км зарегистрировано «зеркальное» облако, которое к 16:22 поднялось на 6 км. В 16:23 облако исчезло, а появилось снова в 17:09 на высоте 6,45 км. В 17:18 опять облако исчезло. В 20:23 на 9,6 км появился слой и к 21:16, опустившись до 9,15 км, исчез.

31 мая. На высоте 10,65 км зарегистрировано облако, которое иногда исчезало, а иногда немного расслаивалось по высоте и при этом наблюдалось два пика в лидарном сигнале.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показано, что комплексные исследования облаков лидаром и многоканальным спутниковым радиометром MODIS позволят создать методику обнаружения из космоса облачных полей, состоящих из преимущественно ориентированных частиц льда. Весьма обнадеживающим обстоятельством служит то, что перистые облака с аномально высокой степенью ориентации ледяных частиц будут иметь более высокий коэффициент отражения на длине волны  $\lambda=1,38$  мкм. Если увязать величину коэффициента отражения с особенностями МОРС таких облаков, то можно разработать правило, по которому удастся распознавать степень ориентации кристаллических частиц в ОВЯ. Для успешного решения этой задачи требуется проведение серии комплексных экспериментов с использованием наземного поляризационного лидара.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 16-05-00710) и Минобрнауки РФ в рамках Программы «Научный фонд имени Д.И. Менделеева Томского государственного университета» (проект № 8.1.12.2015).*

## Список используемых источников

1. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16, № 4. – С. 354–361.
2. Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering / I.V. Samokhvalov, I.D. Bryukhanov, S.V. Nasonov, I.V. Zhivotenyuk, A.P. Stykon // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 55, № 8. – P. 925–929.
3. Matvienko G.G., Samokhvalov I.V., Kaul I.V. Research of the cirrus structure with a polarization lidar: parameters of particle orientation in crystal clouds // Remote sensing of clouds and the atmosphere IX. Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5571. – P. 393–400.
4. Кауль Б.В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук: 01.04.05. – Томск, 2004. – 219 с.
5. University of Wyoming. – URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 10.02.2015).
6. Discriminating clear-sky from cloud with MODIS. Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35) / S. Ackerman, K. Strabala, P. Menzel, R. Frey, C. Moeller, L. Gumley, B. Baum, S. Seemann, H. Zhang. – Santa Barbara: ICES, University of California, 2006. – 124 p.
7. Analysis of experiments on high-level cloud sensing with a satellite radiometer and a ground-based polarization lidar / I.V. Samokhvalov, V.V. Belov, B.V. Kaul, V.V. Bryukhanova, S.V. Nasonov, I.D. Bryukhanova, M.V. Tarasenkov // 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. of SPIE. – 2014. – Vol. 9292. – P. 92922B-1–92922B-8.
8. Афонин С.В. Многофакторный физический подход к атмосферной коррекции спутниковых инфракрасных изображений земной поверхности: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / ИОА СО РАН. – Томск, 2011. – 39 с.



М.А. Андреев\*;  
М.Ю. Ильин\*;  
Д.В. Клочков\*;  
М.А. Коняев\*\*

\* БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

\*\* ООО «НПП "Лазерные системы"», г. Санкт-Петербург.

## ОПТИЧЕСКИЕ И РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ И АЭРОЗОЛЬНО-ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

Показана возможность комплексирования дистанционных средств мониторинга метеорологических параметров атмосферы на основе радиолокационной системы X-диапазона и когерентного лидара 1.5 мкм, расположенных на мобильной платформе. Показаны результаты детектирования сдвига ветра с помощью ветрового лидара.

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, радар, сдвиг ветра.

Решение вопросов, связанных с комплексным экологическим мониторингом окружающей среды, требует соответствующих средств диагностики. Одним из важнейших условий эффективного решения этих задач является получение информации о распределении параметров атмосферы, таких как концентрации различных загрязняющих веществ, наличие аэрозольных образований и скорость ветра, на максимально возможно большей площади.

Технологии дистанционного зондирования атмосферы предлагают множество методов для сбора данных [1]. Однако задачи комплексного анализа выдвигают новые требования к архитектуре систем дистанционного анализа. Для решения этих задач необходимо на единой платформе объединить целый ряд технологий дистанционного зондирования, т.е. обеспечить комплексирование на уровне аппаратной части и на уровне программно-алгоритмического обеспечения.

Мобильные лидарные комплексы доказали свою актуальность и потенциальные возможности в обеспечении оперативного контроля аэрозольного загрязнения атмосферы на дистанциях до 10–15 км [2]. Метеорологические комплексы дистанционного зондирования позволяют решать вопросы, связанные с авиационной безопасностью [3]. Данные комплексы позволяют измерять скорость и направление ветра, определять сдвиг ветра и обеспечивать отображение этой информации у служб управления воздушным движением в режиме реального времени.

Распространяясь в атмосфере, лазерное излучение взаимодействует с составными частями атмосферы, аэрозолями и молекулами. Аэрозольное рассеяние (рассеяние Ми) использует зависимость лидарных сигналов от формы и размера частиц, молекулярная (газовая) атмосфера проявляется в поглощении, в явлениях молекулярного (релеевское), комбинационного, резонансного рассеяния и флуоресценции.

Рассеяние электромагнитного излучения на частицах аэрозоля увеличивается, когда длина волны излучения становится сравнима с типичным размером частиц или меньше его. Поэтому для получения рассеянного излучения от «чистой» атмосферы требуется переход к коротковолновому диапазону. Размер частиц естественного атмосферного аэрозоля составляет 0,1–10 мк, это обуславливает преимущество лидаров перед радарами в условиях прозрачной атмосферы и при отсутствии облаков или осадков.

Для функционирования радиолокационных систем X-диапазона необходимы погодные условия, когда отражаемость атмосферного аэрозоля не ниже определенного значения. Поэтому измерения скорости ветра, атмосферной турбулентности, выявление эффекта сдвига ветра в ясную погоду радиолокатором невозможны [3].

На рис. 1 показана зависимость максимально возможной дистанции детектирования скорости ветра и метеопараметров от величины обратного рассеяния в однородной атмосфере [4]. Из рисунка видно, что каждый из диапазонов имеет свои границы и оптимум по уровню обратного рассеяния. Анализ этих данных показывает, что возможно обеспечить такую комбинацию средств зондирования, при которой осуществляется эффективное детектирование скорости ветра при любых состояниях атмосферы.

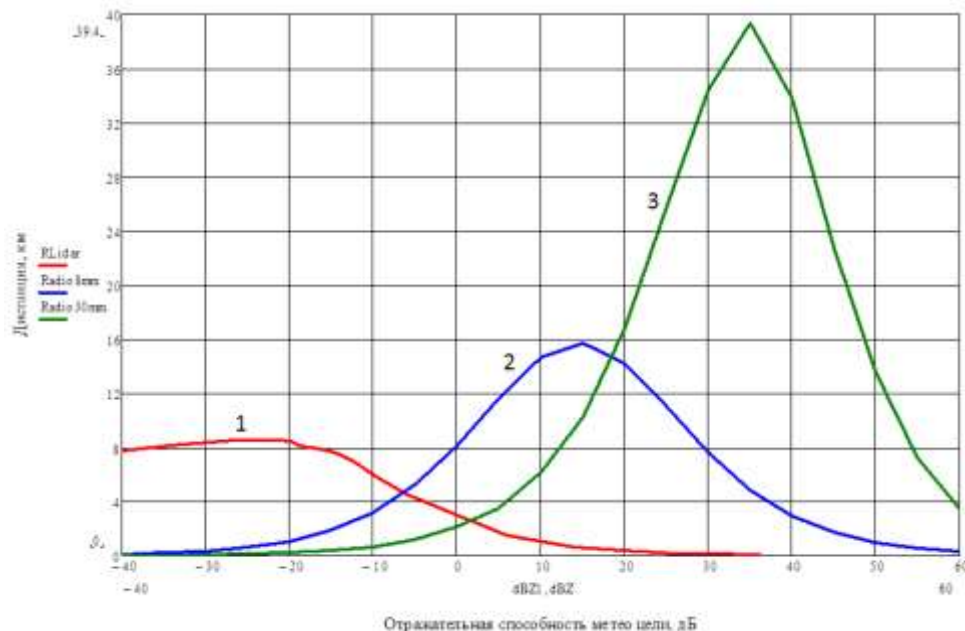


Рис. 1. График зависимости максимальной дистанции определения метеопараметров от погодных условий при использовании ИК лидара (1), Ка-радара (2) и X-радара (3)

В совместной разработке ООО «НПП "Лазерные системы"» и БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова был реализован всепогодный метеорологический комплекс, основанный на комплексировании средств диагностики, который обеспечивает определение скорости, направления и сдвига ветра, а также классификацию зон облачности, осадков, опасных явлений погоды. Всепогодность обеспечивается за счет использования локаторов двух диапазонов: метеорадиолокатора X-диапазона (сантиметрового) при работе с метеорологической дальностью видимости (МДВ) менее 500 м и импульсного ветрового лидара ИК диапазона (микрометрового) при работе с МДВ более 500 м [3]. Внешний вид такого двухдиапазонного комплекса показан на рис. 2.

Метеосистемой X-диапазона с необходимыми доработками является МРЛС «Контур-10СВ», производства НПО «Контур-НИРС». Метеосистема комплектуется щелевой антенной решеткой и компактным приемно-передающим устройством на основе твердотельного генератора.

При МДВ более 500 м, когда система X-диапазона перестает функционировать из-за слабой отражаемости атмосферы, лидарная метеосистема решает задачи определения скорости и направления ветра, атмосферной турбулентности, классификации зон облачности и т. д.

Измерение крупномасштабных турбулентных явлений, таких как горизонтальный или вертикальный сдвиг ветра может быть осуществлено с помощью лидара в режиме кругового или вертикального сканирования, а также профилометра. На рис. 3 представлены результаты, полученные доплеровским лидаром, разработанным ООО «НПП "Лазерные системы"», при вертикальном сканировании в одной плоскости. На рис. 3,а показано детектирование вертикального сдвига ветра, характеризующего крупномасштабную турбулентность, для сравнения на рис. 3,б представлен результат сканирования однородного ветрового потока.



Рис. 2. Двухдиапазонный метеорологический комплекс

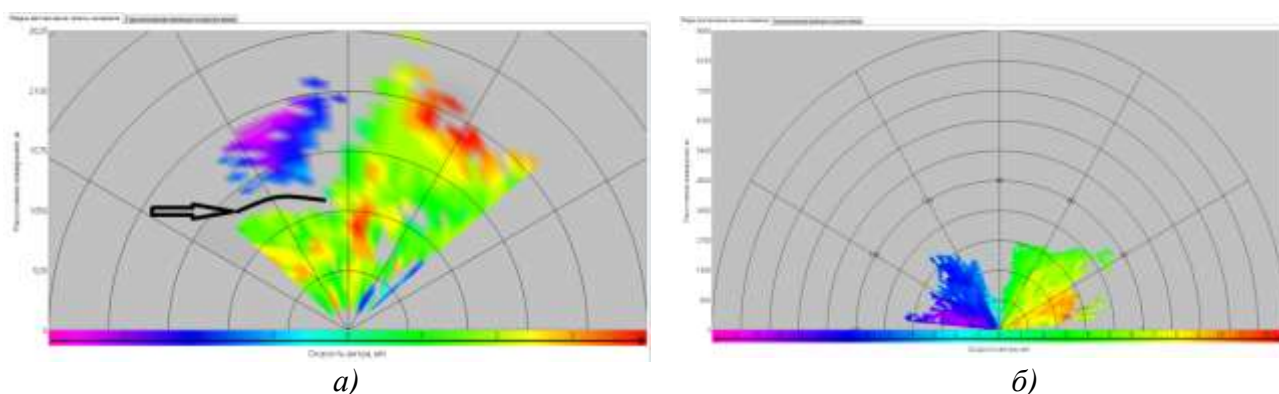


Рис. 3. Результаты измерений ИК-лидаром:  
 а – вертикальный сдвиг ветра (указан стрелкой); б – однородный поток

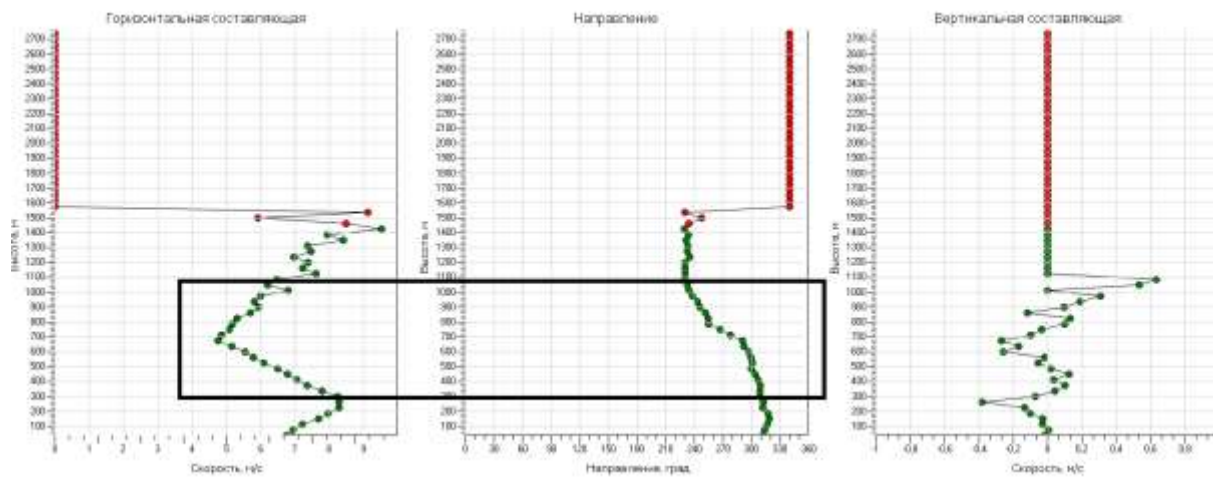


Рис. 4. Вертикальный профиль скорости и направления ветра при наличии сдвига ветра

В режиме вертикального профилометра также возможно детектирование сдвига ветра. На рис. 4 представлены результаты, полученные ИК-лидаром в режиме вертикального профилометра. На графиках горизонтальной скорости и направления отчетливо виден крупномасштабный сдвиг ветра на высотах от 300 м до 1 км, заключающийся в уменьшении скорости ветра с 8 м/с на высоте 300 м до 4 м/с на высоте 700 м и изменении направления на  $80^{\circ}$ .

Таким образом, использование комплексированных средств дистанционного зондирования атмосферы позволяет обеспечить необходимый поток данных об опасных метеоявлениях при любом состоянии атмосферы и наличии осадков.

#### Список используемых источников

1. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
2. Мобильные многоволновые лидарные комплексы / А.С. Борейшо, М.А. Коняев, А.В. Морозов и др. // Квантовая электроника. – 2005. – № (35),12. – С. 1167–1177.
3. Мобильный комплекс для метеорологического мониторинга на основе локационных систем оптического и радиодиапазонов / А.С. Борейшо, А.В. Морозов, А.Е. Орлов и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. – 2014. – Вып. 4. – С. 7–19.
4. Лидарно-радиолокационный метеорологический комплекс / Г.Г. Щукин, А.С. Борейшо, В.Ю. Жуков, М.Ю. Ильин, М.А. Коняев // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 10/3. – С. 100–103.

Б.М. Вовшин,  
*доктор техн. наук;*  
И.С. Вылегжанин,  
*кандидат физико-математических наук;*  
А.Н. Корнеев;  
А.А. Пушков  
АО «НПО "ЛЭМЗ"»

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДОПЛЕРОВСКИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАТОРЫ СО СЖАТИЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Рассматриваются вопросы модернизаций первых российских доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ) на основе внедрения сложных широкополосных зондирующих сигналов с полосой  $\Delta f=10$  МГц. Приводятся предварительные экспериментальные результаты измерения профиля ветра в различных погодных ситуациях в режиме «высокого разрешения» по дальности. Описывается новая структура и элементная база цифрового комплекса аппаратуры, обеспечивающая формирование и первичную обработку (сжатие) широкополосных сигналов. Новый режим работы и новую цифровую аппаратуру предполагается внедрить в первые отечественные ДМРЛ X-диапазона.

Ключевые слова: доплеровский метеорадиолокатор, профиль ветра, широкополосный сигнал, первичная цифровая обработка, высокое разрешение, сжатие сложных сигналов.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений развития теории и техники ДМРЛ является расширение мгновенной полосы зондирующих сигналов (ЗС) с целью получения более детальных характеристик метеобъектов (МО).

Как правило, в современных ДМРЛ используются простые или сложные сигналы с полосой  $\Delta f_c$ , не превышающей 1–2 МГц. Причем сложные сигналы стали применяться только в последние годы, как следствие быстрого развития техники их формирования и сжатия, а также создания твердотельных передающих устройств с принципиально ограниченной импульсной мощностью. Примерами отечественных метеорадиолокаторов со сложными сигналами служат «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10», разработанные в последние годы АО «НПО "ЛЭМЗ"» [1–3]. В этих ДМРЛ используются сигналы с базой  $B = \Delta f_c \tau_n \approx 60$  (где  $\tau_n$  – длительность сигнала) и решена проблема получения сверхнизкого уровня боковых лепестков (УБЛ) корреляционных функций (КФ) при их сжатии до  $\Delta t \approx 1$  мкс.

Перед перспективными ДМРЛ ставятся качественно новые метеорологические задачи, и в первую очередь – распознавание опасных явлений погоды, связанных с нестационарным состоянием атмосферы [4]. Как показал анализ известных источников [5–7], эти задачи в ДМРЛ могут решаться за счет использования широкополосных сигналов с полосой  $\Delta f_c \approx 5 \div 10$  МГц. Очевидно, что в стандартном режиме обзора такая широкополосность ЗС не требуется, так как может привести к необоснованному увеличению потока обрабатываемой информации или снижению производительности локатора. В связи с этим их применение целесообразно в специальном режиме работы ДМРЛ – режиме «высокого разрешения». Этот режим характеризуется работой на заданном угле места ( $\epsilon$ ) с высоким темпом обновления информации  $\sim 5 \div 6$  с.

За рубежом первые попытки создания ДМРЛ с режимом «высокого разрешения», который часто называют режимом «профилометра», уже сделаны французской фирмой «Thales» (BOR-A550) и американской фирмой «Raytheon». В изделиях этих компаний предполагается реализовать сигналы с полосой  $\Delta f_c \approx 4 \div 5$  МГц с коэффициентом сжатия  $K_{сж} \approx 150$ . Однако какие-либо конкретные результаты их применения при зондировании МО к настоящему времени неизвестны.

## ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМА «ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ»

Необходимость расширения полосы ЗС примерно в 10 раз по сравнению с реализованной в «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10» приводит не просто к количественному наращиванию объема цифровой аппаратуры локатора, но требует перехода на качественно новую высокопроизводительную элементную базу.

В АО «НПО "ЛЭМЗ"» в настоящее время проводится разработка новой аппаратуры цифрового формирования и первичной обработки сигналов для перспективных ДМРЛ. Предполагается, что она также будет внедрена в модернизированные «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10», в которых режим «высокого разрешения» будет реализован как опция.

Исходя из требований, предъявляемых к режиму «высокого разрешения» с  $\Delta f_c = 10$  МГц, новая аппаратура создавалась на элементной базе, способной обеспечить:

1) формирование широкополосных сложных сигналов с различной базой на высокой промежуточной частоте  $f_{пр} = 300$  МГц (в «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10»:  $f_{пр} = 60$  МГц);

2) оцифровку принятых сигналов с тактовой частотой  $f_{такт} = 400$  МГц (в «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10»:  $f_{такт} = 80$  МГц) 14-разрядным АЦП;

3) сжатие сигнала с  $K_{сж} \approx 250 \div 300$  (в «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10»:  $K_{сж} \leq 60$ ) за счет существенного расширения памяти для квадратурных коэффициентов алгоритма «свертки» при внутрипериодной обработке;

4) возможность в каждом зондировании формировать и обрабатывать три сигнала: «МОНО» и два сложных сигнала для перекрытия «мертвой», ближней и дальней зон действия (частотный разнос между «МОНО» и сложными сигналами  $\Delta f = 25$  МГц).

Внедрение режима «высокого разрешения» также требует от аппаратуры первичной обработки выдачу не только стандартных продуктов (отражаемость, средняя радиальная скорость, ширина доплеровского спектра и поляризационные характеристики), но и ряд дополнительных параметров:

- значение модуля и азимута горизонтальной составляющей скорости МО ( $|V_r|$  и  $\varphi$ );
- значение модуля вертикальной составляющей скорости МО ( $|V_v|$ );
- значение сдвигов  $|V_r|$ ,  $|V_v|$  и полной скорости ( $|V|$ ),  $\frac{м/с}{км}$ .

Такая потребность накладывает дополнительные требования на необходимые ресурсы вычислительных средств. На рис. 1 показан интегрированный блок цифрового формирования и первичной обработки сигналов перспективных ДМРЛ, в котором приняты вышеуказанные технические требования. При проведении его испытаний особое внимание уделяется вопросу сжатия широкополосного сигнала с  $B = \Delta f_c \tau_{и} \approx 250$  с возможностью обеспечить сверхнизкий УБЛ КФ.



Рис. 1. Блок формирования и первичной обработки

На рис. 2 показан пример экспериментальной КФ сложного ступенчато-фазомодулированного сигнала [8] с полосой  $\Delta f_c = 10$  МГц и длительностью  $\tau_{\text{имп}} = 25$  мкс. Как видно из этого рисунка, ширина максимума сжатого сигнала по уровню  $-3$  дБ не превышает  $0,12$  мкс, а максимальный УБЛ составляет не более  $-50$  дБ при среднем УБЛ не более  $-57$  дБ.



Рис. 2. Структура сжатого сигнала

После внутрипериодной обработки (см. рис. 1) сигнал в блоке децимируется в восемь раз ( $\Delta f_{\text{дс}} \approx 10$  МГц) и поступает в блок междупериодной обработки, где реализуется оценка спектральных характеристик МО. В отличие от «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10» эта обработка осуществляется на основе CUDA-технологии (в «ДМРЛ-С» и «ДМРЛ-10» используются сигнальные процессоры), которая базируется на применении видеокарт для реализации вычислений.

### ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В РЕЖИМЕ «ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ»

Первые экспериментальные результаты по определению профилей ветра были получены в тестовом режиме работы изделия «ДМРЛ-С». Для этого в изделие помимо штатной аппаратуры формирования и внутрипериодной обработки сигналов с  $\Delta f_c = 1$  МГц была дополнительно встроена аппаратура, работающая с широкополосным сигналом с  $\Delta f_c = 10$  МГц (см. рис. 1). Это позволило получать сопоставимые экспериментальные данные для одинаковых внешних условий. Полученные результаты соответствуют азимутальному вращению антенны «ДМРЛ-С» на угле места  $\epsilon = 30^\circ$ .

На рис. 3,а–г показаны экспериментальные графики, полученные в ситуации «Гроза», а на рис. 3,а представлены зависимости СРС (справа) и углового направления ветра (слева) от высоты в километрах. Эти данные были получены в «стандартном» режиме работы «ДМРЛ-С» с сигналом  $\Delta f_c = 1$  МГц. Более детальные картины распределения скорости ветра по высоте представлены на рис. 3,б–г. На этих рисунках соответственно показаны зависимости модуля и направления горизонтальной составляющей, а также вертикальной составляющей ветра на высотах с дискретностью  $15$  м при  $\Delta f_c = 10$  МГц.

Аналогичные четыре графика для ситуации «Ясное небо» представлены на рис 4,а–г. Из полученных экспериментальных данных видно, что информация в режиме «высокого разрешения» позволяет подробно исследовать сдвиги ветра по высоте, т. е. определять «тонкую» структуру профиля ветра. В частности, на рис. 4,б–г видна 3-слойная структура облачности, не определяемая по рис. 4,а при  $\Delta f_c = 1$  МГц.

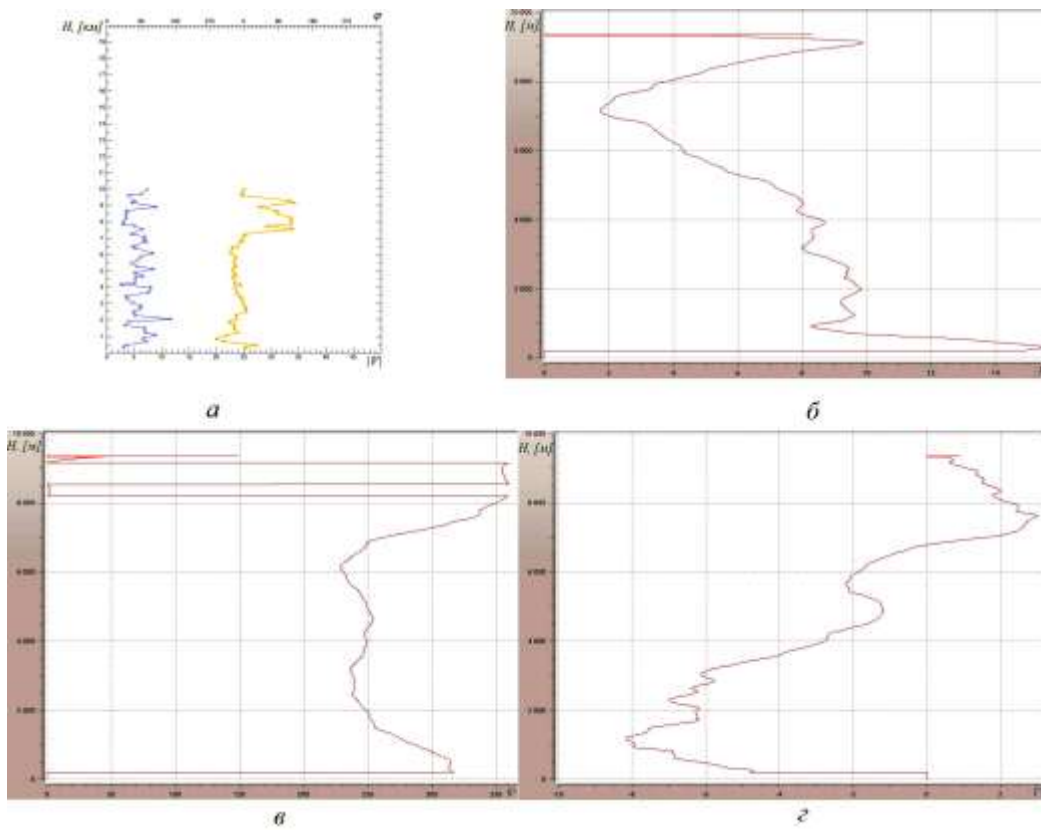


Рис. 3. Профили ветра в ситуации «Гроза»

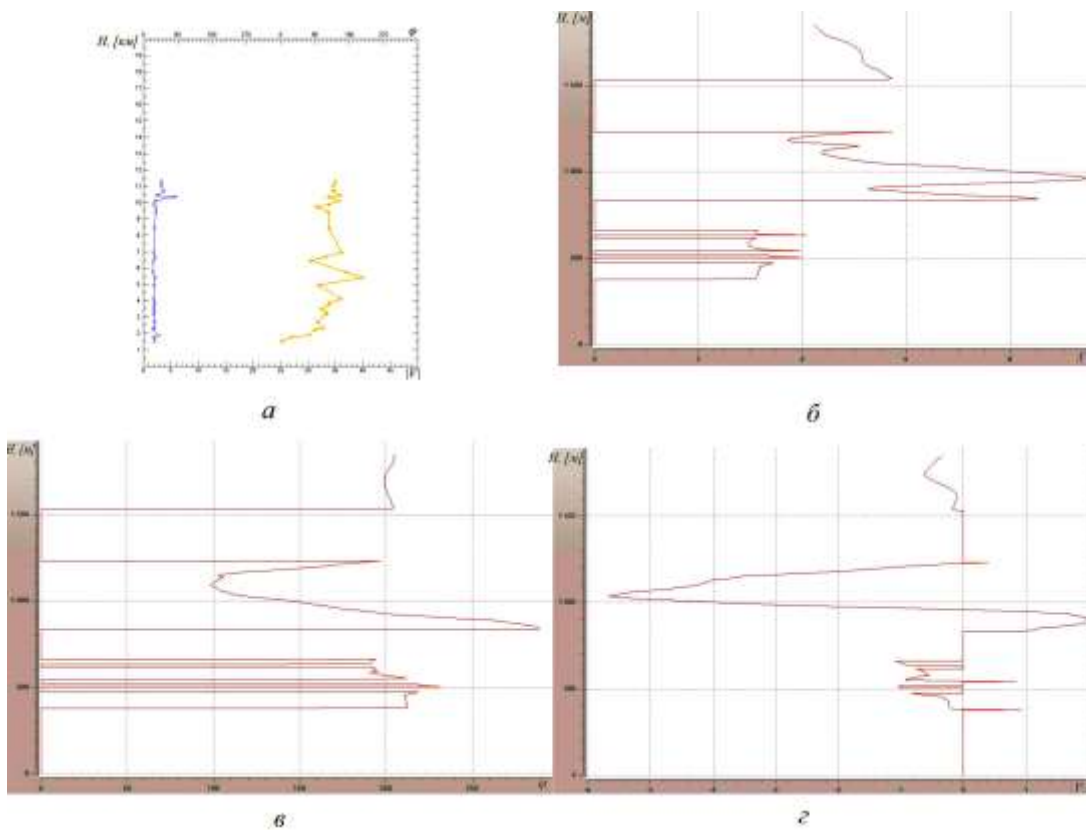


Рис. 4. Профили ветра в ситуации «Ясное небо»



В целом результаты предварительных экспериментальных исследований подтвердили принципиальную возможность определения структуры профиля ветра при использовании широкополосного сигнала с  $\Delta f_c = 10$  МГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги:

1) результаты теоретических и первых экспериментальных исследований подтвердили целесообразность внедрения режима «высокого разрешения» на основе широкополосных сигналов  $\Delta f_c \approx 10$  МГц в перспективных ДМРЛ;

2) разработанная на новой цифровой элементной базе аппаратура формирования и первичной обработки сигналов способна обеспечить реализацию режима «высокого разрешения» и его комплексирования со «стандартным» режимом работы ДМРЛ;

3) первые экспериментальные результаты, полученные в тестовом режиме работы «ДМРЛ-С», позволяют считать, что внедрение широкополосных сигналов с полосой  $\Delta f_c \approx 10$  МГц открывает новые качественные возможности определения характеристик МО при их радиолокационном зондировании;

4) предполагается, что режим «высокого разрешения» в первую очередь будет внедрен в создаваемый АО «НПО "ЛЭМЗ"» твердотельный, мобильный ДМРЛ X-диапазона волн.

## Список используемых источников

1. Полезная модель RU № 121942 класс МПК G0/S/3/05, 2014 г. Доплеровский метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-С» / Г.П. Бендерский, Б.М. Вовшин, И.С. Вылегжанин, В.С. Ефремов, А.Н. Корнеев

2. Первые результаты оперативных доплеровских и поляризационных измерений характеристик метеобразований в «ДМРЛ-С» / Б.М. Вовшин, И.С. Вылегжанин, В.С. Ефремов, А.А. Пушков // Сб. статей II Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы военной геофизики и состояния природной среды». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Т. 1. – С. 370–379.

3. *Vovshin B.M., Vylegzhanin I.S., Efremov V.S.* The New Generation of Russian C-band Meteorological Radars. Technical Features, Operation Modes and Algorithms // Proc. on International Radar Symposium (IRS-2011). – Leipzig (Germany), 2011. – P. 239–245.

4. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. – 2014. – №2. – С. 92–100.

5. URL: <http://www.toshiba.co.jp/sis/en/des/weather/products/x-band/specifications.htm> (дата обращения: 13.08.2015).

6. URL: <http://ewradar.com/product/e700xd/> <http://www.environmental-expert.com/products/ewr-model-e700dp-dual-polarized-doppler-weather-radar-269824> (дата обращения: 13.08.2015).

7. URL: <http://www.baronweather.com/industries/government/weather-radar/> (дата обращения: 13.08.2015).

И.С. Вылегжанин\*,

*кандидат техн. наук;*

В.Ю. Жуков,

*кандидат техн. наук;*

Д.М. Караваев,

*кандидат техн. наук;*

Г.Г. Щукин,

*доктор физико-математических наук, профессор*

\* ОАО «НПО "Лианозовский электромеханический завод"».

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПАССИВНО-АКТИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ**

Рассматривается метод пассивно-активной радиолокации для повышения точности оперативного определения профилей водности конвективных облаков, водозапаса облаков, интенсивности осадков при решении задач штормооповещения, обеспечения градозащитных мероприятий и других прикладных задач метеорологии. Обсуждаются основные требования к характеристикам и первые результаты разработки пассивно-активного радиолокатора С-диапазона.

Ключевые слова: метод пассивно-активной радиолокации, метеорологический радиолокатор, микроволновый радиометр, пассивно-активная радиолокационная система, водозапас облаков, интенсивность осадков

### **ВВЕДЕНИЕ**

Метод пассивно-активного радиолокационного зондирования атмосферы [1] сочетает достоинства радиотепловых и радиолокационных наблюдений облаков и осадков, он является более информативным методом исследования облаков и осадков по сравнению с методом радиолокации [2]. Исследования по совместному использованию радиолокаторов и микроволновых радиометров при решении задач метеорологии для изучения атмосферы начались в начале 70-х прошлого столетия [3–5]. К числу задач пассивно-активного зондирования относятся следующие: определение водозапаса облаков, определение профилей водности вдоль луча зондирования, оценка содержания мелкокапельной и крупнокапельной фракции водозапаса облака, выявление переохлажденных зон облачных образований с целью предупреждения возможного обледенения самолетов [6]. С практической точки зрения перспективен радиолокационно-радиометрический метод выявления градоопасных зон переохлажденных облаков [7].

В статье рассмотрены вопросы интерпретации данных пассивно-активного зондирования атмосферы, обсуждаются пути реализации пассивно-активного радиолокатора для оснащения сети штормооповещения на территории России.

### **МЕТОД ПАССИВНО-АКТИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ**

Известно, что радиолокационному методу определения водности облаков и интенсивности дождей на основе использования корреляционных связей радиолокационной отражаемости с метеопараметрами атмосферы присущи значительные погрешности, обусловленные региональной зависимостью этих связей от сопутствующих метеоусловий. Это объясняется зависимостью радиолокационной отражаемости от распределения частиц облаков или осадков по размерам. Для повышения точности определения водности облаков и интенсивности осадков рассматривается пассивно-активный метод.

В основе пассивно-активного метода лежат связи характеристик собственного радиотеплового излучения, характеристик рассеяния частицами облаков и осадков с искомыми па-

раметрами облаков и осадков, причем эти связи вытекают из уравнений переноса радиотеплового излучения в атмосфере [1] и радиолокации [2] соответственно.

Пассивно-активный метод определения средней водности конвективных облаков основан на измерении водозапаса зондируемой зоны с помощью микроволнового радиометра и ее протяженности с помощью активного канала пассивно-активной станции. В соответствии с этим методом среднюю водность облака  $\overline{w}(\vec{l})$  вдоль направления зондирования определяют по соотношению:

$$\overline{w}(\vec{l}) = W(\vec{l})/L(\vec{l}), \quad (1)$$

где  $L(\vec{l})$  – протяженность зондируемой зоны облака (дождя), определяемая с помощью активного канала (радиолокатора);

$W(\vec{l})$  – водозапас облака вдоль направления визирования, определяемый с помощью радиометра.

В общем виде выражение для водозапаса облаков записывается в следующем виде:

$$W(\vec{l}) = k_w(v, T_{cl})^{-1} [\tau(v, \vec{l}) - \tau_d(v, \vec{l}) - k_q(v)Q(\vec{l})], \quad (2)$$

где  $k_q(v)$  – эффективный удельный коэффициент поглощения в водяном паре;

$k_w(v, T_{cl})$  – эффективный удельный коэффициент поглощения в облаках;

$\tau_d(v)$  – поглощение в кислороде;

$\tau(v)$  – измеряемое радиометром полное поглощение атмосферы;

$Q(\vec{l})$  – влагозапас атмосферы вдоль луча зондирования.

Информативные участки спектра частот для определения водозапаса облаков находятся в «окнах прозрачности» атмосферы 5–15 ГГц, 30–38 ГГц, 75–95 ГГц. Для исследования стадии зарождения облаков Cuhum, Cumed радиометрические измерения проводятся на частотах около 36 ГГц (и/или 90 ГГц), а для стадии мощных Сб оптимальным является диапазон частот 5–9,6 ГГц. Применение двухчастотного радиометра (например, 36,5 ГГц и 9,3 ГГц) позволяет эффективно исследовать облака на различных стадиях их развития Cumed, Cusong, Сб. Погрешность определения водозапаса облаков составляет около 30%.

Для перехода от водности к интенсивности дождя используются соотношения [11]:

$$I = 3,4w^{1.33} \quad (\text{при } w \leq 0,32 \text{ г/м}^3), \quad I = 2,8w^{1.17} \quad (\text{при } w > 0,32 \text{ г/м}^3). \quad (3)$$

Пассивно-активный метод определения профилей водности конвективных облаков основан на измерении водозапаса зондируемой зоны с помощью микроволнового радиометра и оценки весовой функции водности с помощью активного канала пассивно-активной станции:

$$w(\vec{l}) = \frac{Z(l)^{1/\beta}}{\int_{l_1}^{l_2} Z(l)^{1/\beta} dl} W(\vec{l}), \quad (4)$$

где  $Z(l)$  – радиолокационная отражаемость;

$l_1, l_2$  – границы облака по данным радиолокатора;

$\beta$  – параметр, зависящий от распределения капель по размерам, в работе [2] рекомендуется  $\beta=2$ .

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПАССИВНО-АКТИВНОГО РАДИОЛОКАТОРА

Возможные различные пути технической реализации пассивно-активного радиолокатора рассмотрены в работах [1, 6]. Перспективным представляется вариант, обеспечивающий

совмещенную работу радиолокатора и радиометра с общей антенной в режиме одновременных измерений. Новый пассивно-активный радиолокатор, в отличие от первых разработок пассивно-активных радиолокаторов [9], должен обеспечивать производство радиометрических наблюдений атмосферы в стандартном режиме радиолокационного обзора при скорости сканирования антенны по азимуту  $36^\circ$  в секунду.

Основными требованиями, предъявляемыми к пассивно-активному радиолокатору, для задач штормооповещения являются следующие: радиолокационные и радиометрические характеристики атмосферных образований должны получаться одновременно в реальном масштабе времени из одной и той же области исследуемого пространства, причем должны соблюдаться принципы синхронности и одинаковой направленности; должны быть обеспечены условия электромагнитной совместимости активного и пассивного каналов (уровень развязки пассивного и активного каналов должен быть не менее 140 дБ). Характеристики радиометра должны соответствовать указанным далее параметрам: центральные частоты 5,5–9,6 ГГц; флуктуационная чувствительность не хуже  $0,1 \text{ Кс}^{-0.5}$ ; темп измерений 10–20 мс; погрешность измерения радиоярких температур 1–1,5 К. Флуктуационная чувствительность компенсационного радиометра определяется выражением [8]:

$$\delta T = \alpha \cdot T_{\text{сист}} \cdot \left[ \frac{\Delta F}{\Delta f} + \left( \frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{сист}}$  – шумовая температура системы;

$\Delta F$  – полоса выходного фильтра нижних частот;

$\Delta f$  – полоса усиления приемника;

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от режима работы радиометра;

$\frac{\Delta G}{G}$  – низкочастотные относительные флуктуации коэффициента усиления.

Установленные требования к радиометру не противоречат возможностям практической реализации на современной элементной базе.

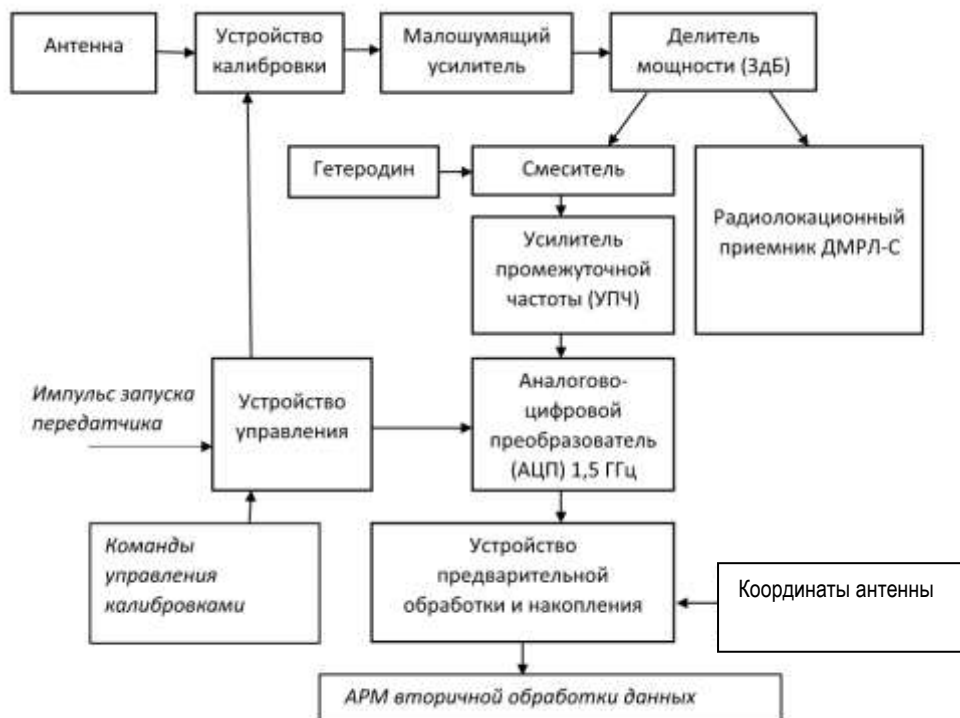


Рис. 1. Схема радиометрического канала пассивно-активной станции ДМРЛ-С

Современный вариант пассивно-активного радиолокатора для задач штормоповещения может быть построен на базе серийного ДМРЛ-С (несущая частота 5,625 ГГц) [10, 11]. Предлагаемый вариант обеспечивает совмещенную и одновременную работу радиометрического канала с радиолокационным каналом на штатную антенну ДМРЛ-С, причем его реализация не требует изменений конструкции антенно-волноводного тракта ДМРЛ-С. При этом радиометрический и радиолокационный приемники имеют отдельные системы предварительной обработки данных, а работа радиометрического канала синхронизирована с работой ДМРЛ-С.

Упрощенная схема радиометрического канала пассивно-активного радиолокатора ДМРЛ-С приводится на рис. 1. Радиометр предназначен для измерения интенсивности радиотеплового излучения облаков и осадков в диапазоне частот 5,25÷6 ГГц. Радиометр построен по схеме супергетеродинного приемника детектирования полной мощности, на входе радиометрического приемника используется штатный усилитель МШУ. Для разделения сигналов активного и пассивного каналов на выходе МШУ используется направленный ответвитель. В состав радиометра также входят аналого-цифровой преобразователь АЦП (разрешение 8 разрядов, полоса 1,5 ГГц), блок калибровок, блок предварительной обработки. На этапе предварительной обработки радиометрических данных формируются 18 элементарных частотных отрезков (с шириной полосы частот 37 МГц), в каждом канале фильтруются помехи и рассчитывается среднее значение мощности (с интервалом 10 мс). Таким образом, каждую секунду формируется файл, где записываются результаты радиометрических измерений для каждого канала с привязкой к угловым координатам (азимут, угол места). Рассмотренный вариант пассивно-активного радиолокатора реализован в АО «НПО "ЛЭМЗ"» [10].

Пассивно-активный радиолокатор на базе ДМРЛ-С перспективен для внедрения в оперативную практику метеорологических наблюдений с помощью создаваемой сети радиолокаторов на территории России [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод пассивно-активного зондирования атмосферы получил развитие для определения водозапаса облаков, профилей влажности мощных конвективных облаков. Сформулированы требования к пассивно-активному радиолокатору для задач штормоповещения, рассмотрен вариант его реализации на базе ДМРЛ-С, обеспечивающий синхронную работу пассивного и активного каналов в стандартных режимах наблюдений облаков и осадков.

## Список используемых источников

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 283 с.
2. *Степаненко В.Д.* Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 342 с.
3. Совместные радиотепловые и радиолокационные измерения метеопараметров облаков / А.Е. Башаринов, А.Г. Горелик, В.В. Калашников, Б.Г. Кутуза // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1970. – Т.6, № 5. – С. 526–530.
4. *Сальман Е.Н., Щукин Г.Г.* О возможности определения интенсивности жидких осадков методом пассивной и активной радиолокации: рефераты докладов на Всесоюзной конференции по радиометеорологии. 19 – 21 июня 1972 г. – Фрунзе. – С. 106–110.
5. *Степаненко В.Д.* Способ определения средней влажности облаков с помощью радиотеплолокационной и радиолокационной аппаратуры // Инф. сборник ЛВИКА имени А.Ф. Можайского. – 1968. – № 92.

6. *Щукин Г.Г., Булкин В.В.* Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. – Муром: ИПЦ МИВлГУ, 2009. – 166 с.
7. *Абшаев М.Т., Кармов Х.Н.* Активно-пассивный метод обнаружения градовых очагов в кучево-дождевых облаках // Труды ВГИ. – 1976. – Вып. 33. – С. 43–46.
8. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
9. Пассивно-активная радиолокационная станция для исследования атмосферы / Н.В. Горностаев, А.И. Новосёлов, В.А. Петрушевский, Е.М. Сальман, А.А. Федоров, Г.Ф. Шевела, Г.Г. Щукин // Труды ГГО. – 1975. – Вып. 328. – С. 120–124.
10. Разработка метеорологического пассивно-активного радиолокатора на базе ДМРЛ-С / Г.Г. Щукин, И.А. Вылегжанин, Д.М. Караваев, В.Ю. Жуков // V Армандовские чтения: Практическая радиолокация: материалы Всероссийской научной конференции (Муром, 29.06 – 1.07.2015). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2015. – С. 120–124.
11. *Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Состояние и перспективы доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 2. – С. 92–100.

А.Г. Горелик\*,

*доктор физико-математических наук, профессор;*

Д.В. Ермилов\*;

В.М. Калмыков\*;

М.А. Кононов\*\*,

*кандидат техн. наук, доцент;*

К.В. Куликовский\*\*;

В.В. Стерлядкин\*\*,

*доктор физико-математических наук, профессор;*

А.В. Хомяков\*,

*кандидат техн. наук;*

Н.В. Ширшов\*\*\*,

*кандидат техн. наук*

\* ОАО ЦКБА, г. Тула.

\*\* МИРЭА, г. Москва.

\*\*\* ЦЭНКИ, г. Москва.

## **НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРОВОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ К<sub>а</sub> ДИАПАЗОНА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ**

Рассмотрены результаты натуральных измерений поля ветра и его характеристик с помощью радиолокационных станций (РЛС) миллиметрового диапазона. Проводится оценка метеорологического потенциала по уровню отражений от метеообъектов различного вида. Анализируется форма сложных сигналов, проводится их интерпретация на основе спектральных и пространственных закономерностей изменения параметров сигнала.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор К<sub>а</sub> диапазона, интерпретация отраженных сигналов, ветровой профайлер, измерение поля ветра.

Одной из самых сложных задач радарной метеорологии является интерпретация получаемых данных и перевод их в метеорологические значения измеряемых величин. Особую значимость эта задача приобретает при работе в коротковолновом диапазоне длин волн, например в сантиметровом или миллиметровом. В работах [1, 2] описаны проблемы, связанные с неоднозначностью измеряемых скоростей, возникающие в сантиметровом диапазоне длин волн при зондировании на больших дальностях. Там же предложены возможные методы решения проблемы, основанные на использовании двух режимов зондирования и корреляционной обработки получаемых данных. В настоящей работе приводятся данные натуральных измерений профиля ветра, выполненных в зимний период 2016 года с помощью импульсно когерентного доплеровского радиолокатора, работающего в миллиметровом диапазоне длин волн. Обсуждаются возможности радиолокаторов такого вида и проблемы интерпретации данных, которые требуется разрешать при разработке программного обеспечения.

Технические характеристики разработанного РЛС представлены в работе [3]. Идеология построения ветрового профайлера, методика измерений и алгоритмы программного обеспечения были разработаны МГУПИ. Экспериментальный образец, опытные образцы и программное обеспечение изготавливались в ОАО ЦКБА г. Тула. Натурные испытания экспериментального образца РЛС, которые проводились в г. Туле, в целом подтвердили ожидания разработчиков. Во-первых, регистрировались отражения от метеообразований, которые не регистрировались визуально при «ясном небе». Радиолокатор регистрировал сигнал в слое от 800 м до 13 км от оптически прозрачной облачности, через которую наблюдалось солнце при возвышении над горизонтом около 15°. Приведенные оценки показывают, что потенциал созданного радиолокатора позволяет регистрировать отражаемость на уровне -50 dbZ на дальности 1 км. Рассмотрим типичные результаты измерений, полученные в зимний период 16.01.2016 с помощью описанной выше РЛС, которая располагалась на крыше 30-метрового здания.

Данные измерений имеют некоторые особенности, которые требуют детального анализа и корректной интерпретации. На рис. 1 изображена копия экрана при работе программы просмотра данных РЛС. Слева – доплеровский спектр мощности, полученный с определенной дальности, на которую указывает курсор, находящийся между панелями. Справа – зависимость мощности сигнала от высоты, рассчитанная для выбранного в верхней строке экрана направления зондирования

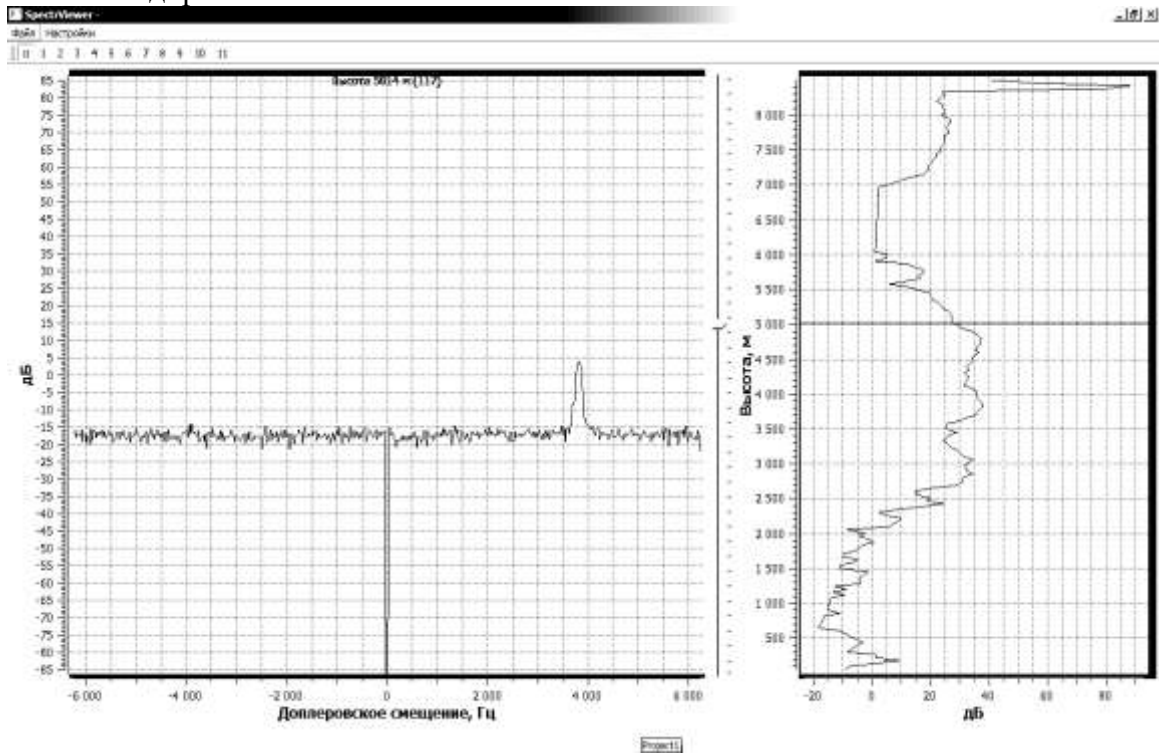


Рис. 1. Копия экрана для программы отображения радиолокационных данных

Пример изменения формы спектров при изменении азимута при коническом зондировании под углом места  $\beta=45^\circ$  показан на рис. 2.

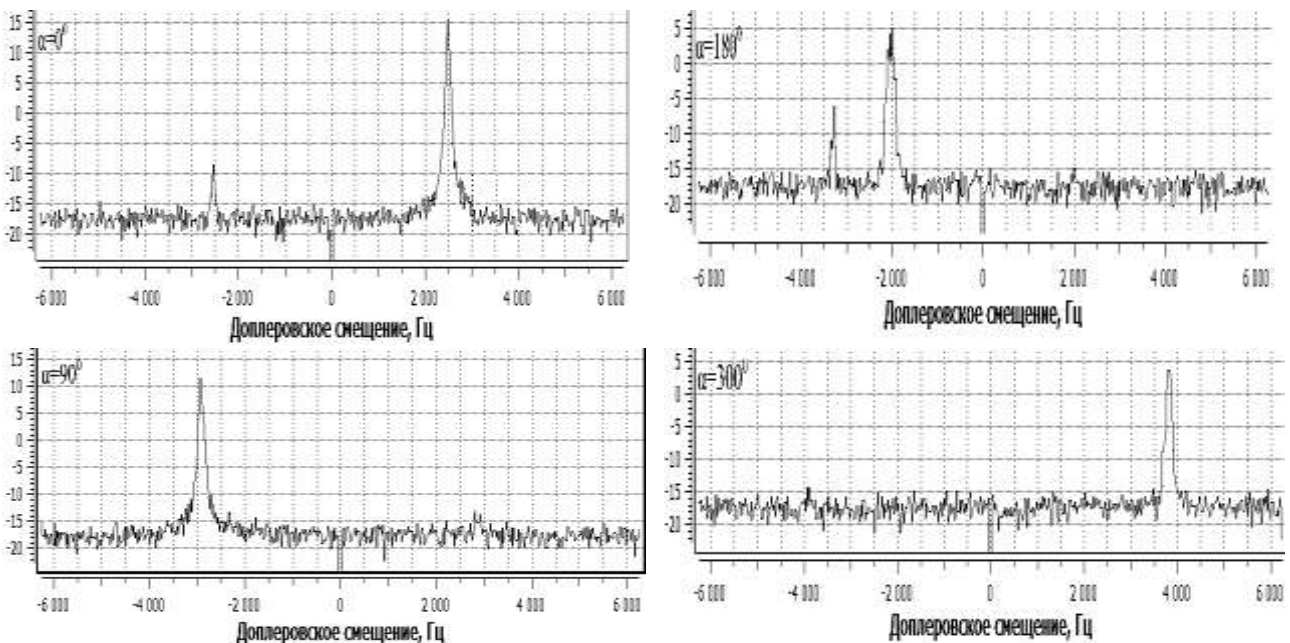
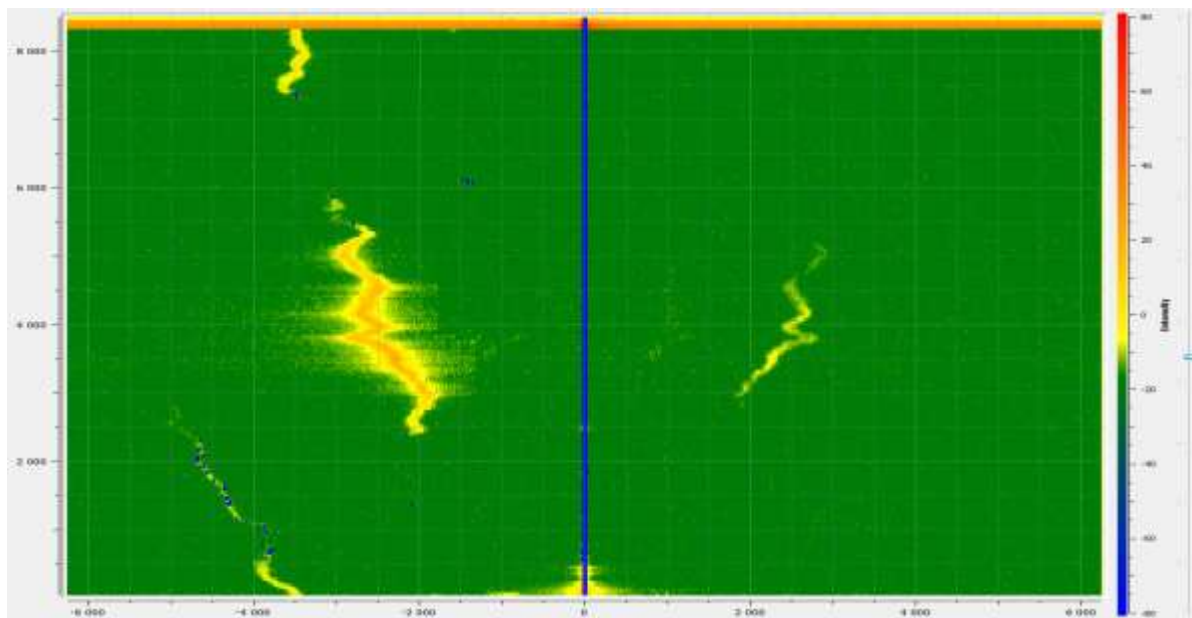


Рис. 2. Доплеровские спектры мощности, полученные для высоты  $984 \text{ м} \pm 21 \text{ м}$  при различных азимутах зондирования. Угол места  $45^\circ$



На рис. 3 показана спектрограмма – зависимость спектральной плотности от высоты, полученная для направления  $\alpha=90^0$ . Особенностью спектров является тот факт, что при значительных уровнях сигнала в спектре присутствует два максимума, один из которых на 20–25 дБ слабее другого по спектральной плотности. На спектрограмме отчетливо видно, что слабый сигнал имеет строго симметричное расположение по отношению к мощному максимуму. Объясняется это, по-видимому, неполным подавлением сигналов при квадратурной обработке.



*Рис. 3. Спектрограмма, полученная для направления зондирования  $\alpha=90^0$ . Сигнал на высотах свыше 8000 м имеет продолжение в виде сигнала второй дальности на высотах 0–2000 м*

Другой особенностью полученных сигналов является то, что в слое 50–2000 м имеется слабый сигнал, который является «продолжением» сигнала на предельной высоте 8500 м. Логичным объяснением сложившейся ситуации является предположение, что второй максимум формируется импульсом на второй дальности, расположенным на расстоянии  $\Delta R=cT_{\text{повт}}/2$  от первого. Учитывая, что частота повторения импульсов составляет 12,5 кГц, получим, что  $\Delta R=8520$  м. При мощной облачности и высоком потенциале станции получение сигнала до высот 10–11 км представляется вполне возможным. Подтверждением предположения о сигнале со второй дальности служит тот факт, что при изменении азимута зондирования максимумы вполне закономерно изменяют свое положение по оси частот.

На рис. 4 в полярных координатах в виде зависимости проекции скорости  $V$  от азимута зондирования  $\alpha_z$  представлены точки максимумов спектров. Они ложатся вблизи окружности, диаметр которой задает вектор ветра на данной высоте. Крестики соответствуют положительным значениям проекций скорости, кружочки – показывают отрицательные значения проекций скоростей. Интерес представляет другая особенность точек, показанных на рис. 4. Видно, что положение крестиков имеет большие значения радиус-вектора, чем кружочки. Это связано с наличием гравитационного падения рассеивателей, которое проявляется при зондировании в противоположных направлениях.

В результате обработки данных, представленных на рис. 4, получено, что скорость ветра на высоте 5014 м составила 15,8 м/с, а скорость гравитационного падения рассеивателей составила  $0,48 \pm 0,08$  м/с.

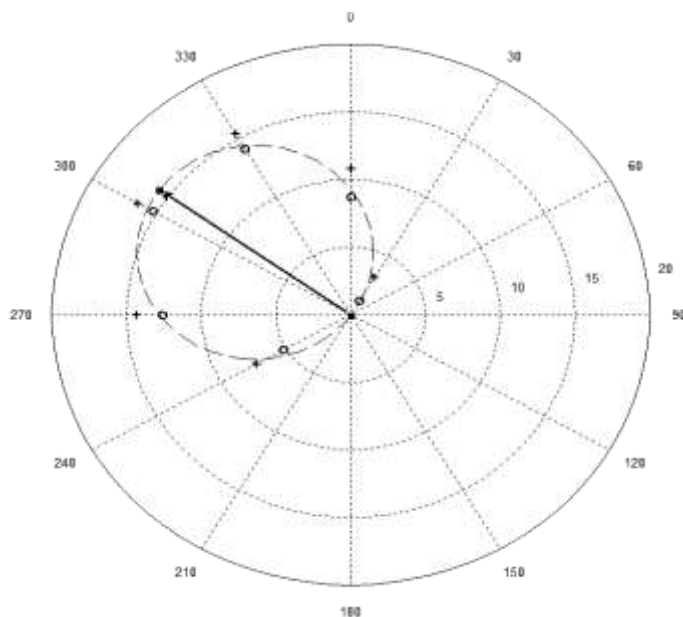


Рис. 4. Зависимость проекции скорости рассеивателей  $V$  от азимута зондирования на высоте 5014 м

В настоящее время создано и обрабатывается программное обеспечение, позволяющее определять градиенты ветра, интенсивность турбулентности (в виде скорости диссипации турбулентной энергии). Накапливаются статистические данные по отражаемости различных метеорологических объектов в миллиметровом диапазоне длин волн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Натурные измерения, проведенные на базе миллиметрового радиолокатора, показали, что потенциал созданного ветрового радиолокатора позволяет регистрировать отражаемость на уровне  $-50\text{dbZ}$  на дальности 1 км. Это обеспечивает регистрацию ветра при наличии тумана, любых осадков и всех видов облаков до высоты 5 км. Разработаны методы повышения дальности зондирования РЛС за счет обработки сигналов на вторых дальностях. Получена важная статистическая информация об отражаемости различных метеообразований в миллиметровом диапазоне длин волн. Планируются дальнейшие натурные исследования радиофизических свойств метеообразований в миллиметровом диапазоне длин волн.

## Список используемых источников

1. В.В. Стерлядкин Способ снятия неоднозначности измерений скорости и дальности для импульсно-доплеровских систем // Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т.2. – С. 139–144.
2. В.В. Стерлядкин Новые методы обработки сигналов в импульсно-доплеровских системах зондирования атмосферы: пленарный доклад // IV Всероссийские Армандовские чтения. – Муром, 2014. – С. 20–30.
3. Ветровой профайлер  $K_a$  диапазона. Результаты сравнительных натурных испытаний / В.В. Стерлядкин, М.А. Кононов, А.В. Желтов и др. // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». – Муром: МИ ВлГУ, 2013. – С. 158–163.

А.В. Гусев\*;

В.Э. Иванов\*,

*доктор техн. наук, профессор;*

С.И. Кудинов\*,

*доцент;*

О.В. Плохих\*;

Н.В. Ширшов\*\*,

*кандидат физико-математических наук*

\* ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

\*\* ФГУП «ЦЭНКИ», г. Москва.

## **НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СИСТЕМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В докладе сделан анализ современного состояния и перспектив совершенствования отечественных систем радиозондирования радиолокационного и радионавигационного типа, использующих контактный метод определения параметров атмосферы с помощью аэрологических радиозондов (АРЗ). Отмечены особенности разработки и применения радионавигационных систем зондирования, использующих для определения местоположения АРЗ сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS.

Ключевые слова: система радиозондирования атмосферы, радиолокатор, аэрологический радиозонд, ГЛОНАСС/GPS, глобальная навигационная спутниковая система.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Системы радиозондирования (СР) атмосферы предназначены для получения наиболее точной аэрологической информации о термодинамических параметрах свободной атмосферы, таких как температура, влажность, давление, направление и скорость ветра, а также для измерения специальных параметров (радиации, уровня промышленных выбросов газов, аэрозолей и т. п.) на высотах от уровня земли до 35÷40 км. Аэрологическая информация используется для прогнозов погоды и климата, обеспечения полетов авиации, стрельбы артиллерии, ракетных войск, пусков ракет-носителей (РКН) [1].

С момента первого выпуска радиозонда профессором П.А. Молчановым 30 января 1930 года контактный метод определения вертикальных профилей температуры, влажности воздуха, скорости и направления ветра и других параметров атмосферы, осуществляемый с помощью аэрологических радиозондов, запускаемых различными методами доставки в свободную атмосферу, остается основным, так как является наиболее точным и недорогим [1, 2].

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ**

В мировой практике сформировались следующие основные типы СР, отличающиеся методом измерения координат и скорости движения АРЗ: радиолокационный, радиопеленгационный и радионавигационный [1–3].

В СССР были разработаны и успешно эксплуатировались радиолокационные СР гражданского и военного назначения: А-22-«Малахит» (1957), РКЗ – «Метеор», РКЗ – «Метеорит» (1959), РКЗ – «Метеорит-2» (1965), РПМК 1Б44, МРЗ-АВК-1 (1986). Отличительной особенностью отечественных СР было удачное применение в составе АРЗ свержегенеративного приемопередатчика (СПП), обеспечивающего передачу на одной несущей частоте телемет-

рической информации, измерение угловых координат и точное определение наклонной дальности импульсным методом на расстоянии свыше 300 км.

В 1997 году для преодоления сложившегося отставания от уровня зарубежных СР сотрудниками УрФУ (УПИ имени С.М. Кирова) в инициативном порядке при поддержке ОАО «МЕТЕО» был разработан опытный образец малогабаритной полупроводниковой аэрологической РЛС «Бриз» с цифровой обработкой информации. РЛС «Бриз» экспонировалась на международной выставке в г. Линдау (Германия, 1997 год), а затем эксплуатировалась Гидрометслужбой г. Бреста, Республики Беларусь. Своевременная разработка и успешная демонстрация характеристик РЛС «Бриз» в те годы показали возможность собственного производства малогабаритных СР в России с требуемыми параметрами и предотвратили необоснованные закупки аналогичной импортной техники.

В 2002–2007 годах сотрудниками УрФУ совместно с АО «УПП «Вектор» на основе конструктивных решений и опыта создания РЛС «Бриз» был разработан аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс (АРВК) «Вектор-М» (рис. 1), который в настоящее



Рис. 1. АРВК «Вектор-М»

время находится в эксплуатации на аэрологической сети Росгидромета. АРВК «Вектор-М» укомплектован пассивной фазированной антенной решеткой (ФАР), содержащей антенну с широкой и узкой диаграммами направленности. Такое конструктивное решение ФАР обеспечивает максимальную защиту от внешних помех за счет высококачественного полосового фильтра и надежное сопровождение АРЗ при запуске путем оперативного переключения широкой и узкой диаграмм направленности. ФАР управляется в вертикальной плоскости электромеханическим приводом в диапазоне углов от  $-10$  до  $+180^\circ$ . В азимутальной плоскости ФАР управляется в пределах  $\pm 370^\circ$ . Основная СВЧ приемная и передающая аппаратура РЛС смонтирована на полотне ФАР. Управление комплексом и прием информации осуществляются в блоке обработки информации. Кроме наблюдения сигнала АРЗ на экране осциллографа приемная аппаратура РЛС снабжена спектроанализатором, позволяющим оперативно оценивать помеховую обстановку в диапазоне рабочих частот СР перед

запуском и наблюдать спектр передатчика АРЗ в полете [1, 2]. В эти же годы Центральной аэрологической обсерваторией был разработан АРВК МАРЛ-А, оснащенный активной фазированной решеткой. Основные технические характеристики АРВК «Вектор-М» и МАРЛ сопоставимы. Разработка этих АРВК позволила начать замену на сети Росгидромета выработавших свой ресурс РЛС АВК-1.

В целом эксплуатационные характеристики СР были улучшены, но технология измерений, методы передачи и вторичной обработки метеорологических параметров остались прежними. Поэтому отставание от зарубежных СР, широко использующих радионавигационный метод, осталось. Из зарубежных СР наиболее известным является радиопеленгатор РТ-20 с комплектом радиозондов финской фирмы Вайсала, входящий в состав мобильных комплексов зондирования атмосферы армий НАТО типа АН/ТМQ-41, АН/ТМQ-52 [4].

Для преодоления отставания российской аэрологической сети от зарубежного уровня сотрудники УрФУ в течение 2002–2009 годов проводили исследования по созданию навигационной СР на основе использования сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS. В 2009 г. был разработан и успешно прошел испытания рабочий макет радионавигационной СР [5].

В 2010–2012 годах при финансовой поддержке Минобрнауки России УрФУ совместно с АО «Радий» был выполнен НИОКР по теме «Исследование и разработка системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых платформ GPS/ГЛОНАСС, модернизация радиозондов типа МРЗ-3 для аэрологической сети Росгидромета». В настоящее время работы

по данной ОКР завершены. СР «Полюс» производится в составе базовой станции, навигационного АРЗ МРЗ-Н1 и комплекса средств обеспечения его выпуска. СР «Полюс» успешно эксплуатируется в интересах аэрологического обеспечения космических программ на космодроме Байконур (2011). Также на ее основе разрабатывается система аэрологического зондирования атмосферы (САЗА) строящегося космодрома Восточный [6, 7].

Радиолокационный радиозонд МРЗ-3МК разработан для внедрения пакетного метода передачи телеметрической информации на аэрологической сети Росгидромета. Положительные результаты испытаний указанных АРЗ обеспечили утверждение их как типа средства измерения и внесение в государственный реестр средств измерений под номерами № 54541-13 и № 54540-13 соответственно. В настоящее время на сети Росгидромета идет опытная эксплуатация АРЗ МРЗ-3МК. Для этого на аэрологической сети АРВК «Вектор-М» и МАРЛ оснащаются новым программным обеспечением [8].

С позиции безопасности принципиально важным для Российской Федерации является одновременная поддержка эксплуатации радиолокационного и радионавигационного типа СР. Радиолокационные (радиопеленгационные) СР являются по принципу работы полностью автономными. Радионавигационные СР типа «Полюс» обеспечивают более высокую точность определения координат АРЗ и скорости ветра, но зависят от наличия сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

## НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Краткий анализ состояния СР, примеры удачных конструкторских и технологических решений, полученных в последние годы при создании радиолокационных и радионавигационных отечественных СР, позволяют сформулировать некоторые направления дальнейших исследований и разработок. Так, например:

- целесообразно реализовать в радиолокационных СР когерентный режим обработки ответного сигнала СПП по дальности, обеспечивающий возможность определения мгновенной скорости движения АРЗ и оценки параметров турбулентности атмосферы, существенное снижение мощности запросного сигнала РЛС, снижение производственных затрат;
- следует повсеместно применить в радиолокационных СР более надежный пакетный метод передачи телеметрической информации с борта АРЗ на РЛС. В настоящее время разработан и испытан совместно с РЛС МАРЛ-А и «Вектор-М» работающий в пакетном режиме радиозонд МРЗ-3МК;
- для обеспечения сопровождения нескольких АРЗ, повышения помехоустойчивости радиотеодолитного режима работы целесообразно использовать узкополосный радиоканал пакетной передачи телеметрической информации на частоте 1680 МГц;
- для повышения надежности и точности измерения координат АРЗ в радиотеодолитном режиме работы совместно с датчиком давления возможно параллельное использование приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС;
- для оценки характеристик турбулентности атмосферы требуется разработать навигационный АРЗ массой не более 100 г, оснащенный быстроходными датчиками метеорологических параметров, и технологию обработки получаемой информации;
- для оперативного определения параметров атмосферы в условиях чрезвычайных ситуаций целесообразно разработать носимый вариант СР;
- учитывая достоинства радиолокационной и навигационной СР, целесообразно совершенствовать и поддерживать эксплуатацию обоих типов радиосистем. Возможно создание на основе радиолокационной СР комплексной радиосистемы, объединяющей их преимущества.

### Список используемых источников

1. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России / В.Э. Иванов, А.В. Гусев, К.А. Игнатков, С.И. Кудинов, И.В. Малыгин, В.Я. Носков, О.В. Плохих, В.В. Рысев, О.А. Черных // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2015. – № 9. – С. 3–49.
2. *Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П.* Радиозондирование атмосферы: Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / под ред. В.Э. Иванова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 596 с.
3. Рекомендация МСЭ-R RS.1165-2. Технические характеристики и критерии эффективности функционирования для систем во вспомогательной службе метеорологии в полосах частот 403 МГц и 1680 МГц. – М.: Международный союз электросвязи, 2006. – 24 с.
4. Headquarters, Department of the Army. Tactics, techniques, and procedures for field artillery meteorology: FM 3-09.15, MCWP 3-16.5. – Field Manual No. 3-09.15. – 2007. – 266 p.
5. *Плохих О.В., Иванов В.Э.* Некоторые результаты разработки системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных платформ GPS-ГЛОНАСС // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2009. – № 6. – С. 66–74.
6. *Богачев П.С., Курташкин С.А.* Аэрологическое обеспечение запусков РКН с использованием навигационной системы радиозондирования атмосферы «Полюс» в районе стартовых комплексов // *Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»* / под общ. ред. М.М. Пенькова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т.2. – С. 42–48.
7. Система аэрологического радиозондирования атмосферы космодрома Восточный / Н.В. Ширшов, П.А. Ламзин, О.В. Плохих, А.В. Гусев, О.А. Черных, С.И. Кудинов, В.Э. Иванов // *Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»* / под общ. ред. М.М. Пенькова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т.2. – С. 192–197.
8. Пакетная передача данных телеметрии в радиолокационных системах радиозондирования атмосферы / Н.В. Ширшов, О.В. Плохих, А.В. Гусев, С.И. Кудинов, В.Э. Иванов, В.В. Рысев // *Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»* / под общ. ред. М.М. Пенькова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014 – Т.2. – С. 184–191.

Д.А. Денисенков;  
В.Ю. Жуков,  
*кандидат техн. наук;*  
О.А. Сивак;  
Г.Г. Шукин,  
*доктор физико-математических наук*

## **ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ СДВИГА ВЕТРА ПО ОЦЕНКАМ ШИРИНЫ СПЕКТРА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА**

Описывается методика проведения эксперимента по подтверждению возможности использования нового метода обнаружения сдвига ветра. Приводятся основные полученные результаты.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, сдвиг ветра, ширина спектра сигнала.

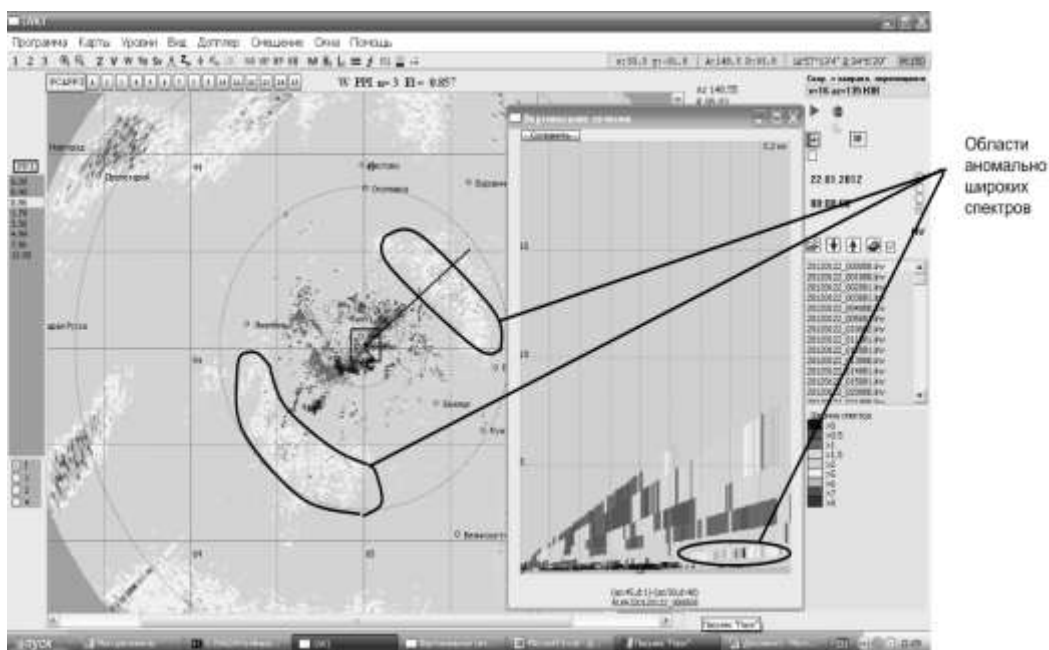
Своевременное обнаружение сдвига ветра – важная задача для обеспечения полетов авиации, и на ее решение тратится много усилий [1]. Применение контактных методов измерения скорости и направления ветра (с помощью анемометров и радиозондов) в данном случае невозможно из-за малой высоты мачт, на которые устанавливаются первые, или из-за малой частоты запуска вторых. Поэтому распространены неконтактные измерители профиля ветра: лидарные, радиолокационные, акустические, радиоакустические. Все они – сложные и дорогостоящие устройства. Кроме того, все имеют какие-либо ограничения использования по погодным или иным условиям, благодаря чему устанавливать их приходится парами, взаимно дополняющими друг друга. Наиболее распространена на данный момент комбинация лидарного и радиолокационного профиломеров. Первый работает в «чистой атмосфере», второй – при наличии в воздухе гидрометеоров или иных элементарных отражателей.

В то же время в каждом большом аэропорту присутствуют метеорологические радиолокаторы, ведущие постоянный мониторинг окружающего пространства. Естественно возникает идея передать им функции радиолокационного измерителя вертикального профиля ветра и тем самым сэкономить значительные финансовые, людские и другие ресурсы. Тем более что в программы вторичной обработки информации данных радиолокаторов такие возможности заложены [2]. Речь идет о методе VAD, однако реально получаемые с его помощью данные не вписываются в требования по разрешающей способности и диапазону высот проведения измерений.

Для корректного оценивания профиля ветра с целью выявления его сдвига, измеряемого в метрах в секунду на 100 футов (30 м), вертикальный размер элемента разрешения радиолокатора не должен превосходить величины 30 м. В «больших» радиолокаторах, имеющих ширину антенного луча примерно  $1^\circ$ , данное условие выполняется на самом краю ближней зоны Френеля, в которой формируется диаграмма направленности. В малогабаритных радиолокаторах они оказываются на границе «мертвой зоны», формируемой из-за бланкирования приемника на время излучения антенной зондирующего импульса. В обоих случаях измерения возможны только внутри небольшого интервала дальностей. Это диктует единственно возможную в сложившейся ситуации методику набора информации – последовательное расположение указанного интервала на каждой из интересующих высот с последующим круговым сканированием антенны. Диапазон высот, важный для авиации, – 500 м. Для просмотра его с шагом 30 м требуется 17 круговых обзоров. Скорость сканирования антенны в режиме «Скорость», при котором оцениваются нужные для рассматриваемой проблемы спектральные характеристики сигнала, равна обычно трем оборотам в минуту. Тогда весь цикл измерений займет шесть минут и, следовательно, для того, чтобы обеспечить стандартный темп

обновления информации (1 раз в 10 мин), радиолокатор должен «забыть» об остальных измерениях и заниматься только восстановлением профиля ветра. То есть получается еще один профилемер, только дороже прежнего.

Очевидно, что интерес может представлять только такой метод, который не требует каких-либо изменений в режиме работы радиолокатора, а нужную информацию извлекает за счет специальной обработки стандартно получаемых данных. Таковым является метод обнаружения опасного сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемого сигнала. Его суть уже излагалась в статье [3] и кратко может быть описана следующим образом: при наличии сдвига ветра и при определенном взаимном расположении антенны радиолокатора и векторов скорости ветра спектр принимаемых отражений становится двухмодальным, а его ширина аномально большой. На формируемых радиолокатором картах ширины спектра радиальных скоростей частиц данная ситуация распознается по появлению на горизонтальных или конических разрезах участков больших значений рассматриваемого параметра, имеющих вид симметрично расположенных относительно радиолокатора дуг окружности. На вертикальных разрезах, сделанных в направлении этих зон, просматриваются начинающиеся на определенной дальности слои аномально широких спектров (рис. 1). По значению ширины спектра в этом слое и в областях, расположенных выше и ниже его и дальности образования слоя, может быть рассчитана величина сдвига ветра.



*Рис. 1. Пример конического и вертикального разрезов на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц*

Теоретические исследования требуют экспериментального подтверждения. Для этого прежде всего необходимо выбрать эталонные данные, с которыми будет сравниваться информация, получаемая исследуемым методом. В качестве таких данных были приняты результаты температурно-ветрового зондирования ближайшей аэрологической станции. Поскольку в распоряжении авторов имелись данные радиолокатора, установленного в г. Валдай, аэрологическая информация бралась со станции «Бологое», в наиболее подробном варианте представленная на сайте Вайомингского университета [4]. То, что зонды запускаются только два раза в сутки, наложило ограничение на выбор экспериментальных данных – анализироваться должны лишь результаты тех обзоров радиолокатора, которые ближе всего по времени к моменту запуска. Кроме того, даже из этих обзоров нельзя выбирать все подряд.



Специфика радиолокатора состоит в том, что он работает только при наличии в окружающем пространстве элементарных отражателей (гидрометеоров, как правило). Поэтому прежде всего были отобраны те из них, в которых наблюдалась облачность более 6 баллов и их средняя радиолокационная отражаемость была не менее 10 дБ. За период с декабря 2011 года по февраль 2012-го их набралось 19.

Каждый из них просматривался на предмет наличия областей повышенного (6 м/с и более) значения ширины спектра радиальных скоростей отражателей в виде симметрично расположенных дуг окружности. Всего было обнаружено девять таких обзоров, для которых рассчитывался сдвиг ветра по формуле

$$W = \frac{\Delta V}{h},$$

где  $\Delta V$  – суммарная величина, на которую изменяется скорость ветра;  
 $h$  – высота слоя, в котором происходит сдвиг ветра.

Величину  $\Delta V$  определяли при помощи карты вертикального разреза, проведенного радиально в направлении максимальных значений (см. рис. 1) в соответствии со следующим выражением для квадрата ширины спектра радиальных скоростей частиц из разрешаемых объемов, захватывающих оба упомянутых выше слоя с различными средними скоростями [3]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{P_1 + P_2} \left[ P_1 \sigma_1^2 + P_2 \sigma_2^2 + \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2} (V_1 - V_2)^2 \right], \quad (1)$$

где  $P_1, P_2$  – средние мощности отражений от нижнего и верхнего слоев соответственно;  
 $\sigma_1, \sigma_2$  – ширина спектра радиальных скоростей частиц из нижнего и верхнего слоев соответственно;  
 $V_1, V_2$  – средние радиальные скорости частиц из нижнего и верхнего слоев соответственно.

Своего максимального значения  $\sigma^2$  достигает при условии  $P_1 = P_2$ . Тогда формула для оценки искомой разности скоростей принимает вид

$$\Delta V = \sqrt{4\tilde{\sigma}^2 - 2\tilde{\sigma}_1^2 - 2\tilde{\sigma}_2^2}, \quad (2)$$

где  $\tilde{\sigma}$ ,  $\tilde{\sigma}_1$  и  $\tilde{\sigma}_2$  – оценки ранее указанных величин. При этом в алгоритмах их нахождения имелись существенные различия. Если две последние искались как средние значения отсчетов, получаемых из участков метеоцели, прилегающих снизу и сверху к слою повышенных значений параметра, то первая определялась как максимальное значение из всех, наблюдаемых в упомянутом слое. Это связано с дискретным характером измерения дальности. Из-за нее высота расположения центра элемента разрешения в большинстве случаев не совпадает с той, на которой выполняется упомянутое равенство мощностей. Это ведет к занижению оценки относительно реального значения параметра. Критерием того, что центр разрешаемого объема совпал с высотой, на которой выполняется равенство мощностей, является увеличение оценки параметра относительно значений в соседних элементах. Именно это максимальное значение и принималось за  $\tilde{\sigma}$ .

Далее определялась толщина слоя  $h$ . Из формулы (1) следует, что аномальное расширение спектра наступает в том случае, если в принимаемом сигнале присутствуют отражения от обоих слоев, находящихся выше и ниже области сдвига ветра. Необходимое условие для этого состоит в превышении вертикальным размером элемента разрешения толщины этой области. Выполняется оно начиная с некоторой дальности, до достижения которой существование рассматриваемого эффекта невозможно. Исходя из сказанного, величину  $h$  оценивали как высоту элемента разрешения радиолокатора на расстоянии, предшествующем началу

слоя аномально больших значений на вертикальном разрезе карты ширины спектра радиальных скоростей. В частности, на рис. 1 данная дальность равна 27 км.

Полученные рассмотренным способом оценки сдвига ветра сравнивались с пороговым значением, принятым равным 1 м/с на 30 м. Из девяти выявленных случаев порог был преодолен в семи.

Одновременно величина сдвига ветра рассчитывалась по аэрологическим данным в соответствии с формулой

$$W_i = \frac{\sqrt{V_i^2 + V_{i+1}^2 - 2V_i V_{i+1} \cos(\theta_{i+1} - \theta_i)}}{h_{i+1} - h_i}, \quad (3)$$

где  $h_i, h_{i+1}$  – высоты, на которых сделаны измерения;  
 $V_i, V_{i+1}$  – оценки скорости ветра на этих высотах;  
 $\theta_i, \theta_{i+1}$  – оценки направления ветра на этих высотах.

Рассматривалась только та информация, что совпадала по времени с уже упомянутыми 19 обзорами. Каждому из них соответствовало несколько оценок для разных интервалов высот. Поскольку обнаружение сдвига ветра наиболее актуально для пограничного слоя атмосферы [5], было введено ограничение по высоте в 1,5 км. Превышение порога 1м/с на 100 футов было зафиксировано в семи случаях. При этом шесть из них по времени и высоте совпали со случаями превышения порога, выявленными радиолокационным способом. Исключение составил один случай, который не был обнаружен радиолокатором. Еще один случай превышения порога, выявленный радиолокационным способом, не был подтвержден аэрологическим.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента получены следующие показатели нового метода:

- 1) оправдываемость, или вероятность правильного обнаружения  $P_{\text{опр}} = 0,86$ ;
- 2) достоверность, или вероятность отсутствия ложной тревоги  $P_{\text{дост}} = 0,86$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что новый метод обнаружения сдвига ветра имеет хорошие вероятностные характеристики. Однако ввиду малого количества наблюдавшихся случаев превышения установленного порога, делать окончательные выводы еще рано. Очевидна необходимость постановки новых экспериментов, как аналогичных приведенному с целью увеличения размера выборки, так и направленных на изучение других характеристик метода. В частности, представляло бы интерес исследование способности метода к измерению параметров сдвига – изменений с высотой скорости и направления ветра.

## Список используемых источников

1. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 2. – С. 92–100.
2. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты / И.А. Готюр, В.Ю. Жуков, Ю.В. Кулешов, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 21.– С. 66–75.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Исследование зависимости пространственного распределения ширины спектра сигнала, принимаемого метеорологическим радиолокатором, от рас-

пределения ветра по высоте в пограничном слое атмосферы // Вестник РосНОУ. – № 10. – 2015. – С. 10–14.

4. Данные аэрологического зондирования со станции «Бологое». – URL: <http://www.weather.uwo.edu> (дата обращения: 20.02.2016).

5. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах: руководящий документ. – Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2005.

Д.А. Денисенков;  
Е.А. Коровин,  
кандидат техн. наук

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДАТЧИК СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

Обобщены результаты технических достижений последних лет в области контроля грозовой активности. Предложен вариант реализации универсальной аппаратной платформы элементов наземных систем мониторинга грозовой активности.

Ключевые слова: мониторинг гроз, определение координат молниевых ударов, универсальная аппаратная платформа датчика грозовой активности.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность мониторинга опасных природных явлений, в частности молниевых разрядов, подробно освещена во многих публикациях, затрагивающих как прогнозирование данных явлений, так и вопросы разработки датчиков систем пассивной локации гроз [1, 2]. На современном этапе мониторинг гроз реализуется одним или несколькими, функционирующими в составе сети, пространственно разнесенными датчиками [3]. В зависимости от задач, решаемых системой пассивной локации, датчики могут размещаться на поверхности Земли, самолетах и космических аппаратах. Наибольшее распространение получили наземные системы, в основе принципа работы которых лежит анализ радиоизлучения, формируемого в результате движения лидера, либо обратного удара.

### СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

Спутниковые системы мониторинга грозовой активности основаны на анализе излучения в ближнем инфракрасном диапазоне и до настоящего времени не получили большого распространения. Космический аппарат GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellite-R Series), имеющий в своем составе систему GLM (Geostationary Lightning Mapper), планируется к запуску в 2016 году [4]. Разрешающая способность системы будет достигать 10 км. Несмотря на достаточно невысокую относительно наземных систем точность определения координат, размещение датчика на геостационарной орбите позволит отслеживать опасные явления в глобальном масштабе, включая не только сушу, но и территорию мировых океанов. Важным преимуществом данной системы является возможность с большей, чем существующие наземные системы вероятностью фиксировать внутриоблачные разряды, что крайне важно для планирования воздушного движения.

Наиболее распространенные в настоящее время наземные системы иностранного производства представлены двумя компаниями: TOA – США и Vaisala – Финляндия [5, 6]. Отечественные системы разрабатываются ООО «Цифровой дракон», ООО «Алвес», ООО «Научно-технологический центр «МАРТ», ООО «ЛОМО МЕТЕО».

Датчики наземных систем мониторинга грозовой активности можно разделить на два типа. К первому типу относятся датчики, позволяющие оценивать дальность и направление молниевых ударов, такие как ФАГ-2Н, ГДА-1 и TSS928. Эти датчики (называемые «местными») работают автономно и обеспечивают пользователя данными о характеристиках молниевых разрядов в радиусе до 100 км. Датчики Alwes 7.04, LPS-200, Верея-МР, LS7002 и TLS200 относятся ко второму типу и позволяют получать координаты ударов молний, функционируя только в составе сети. Каждый датчик второго типа позволяет получить параметры положе-

ния молниевых ударов. Координаты рассчитываются в центре сбора и обработки информации многопозиционной системы. Всего для определения координат требуются данные от 3-4 датчиков. Сложность реализации многопозиционных систем компенсируется более высокой точностью определения координат и значительно большей площадью контролируемой территории.

Состав и достоверность предоставляемой конечному пользователю информации определяется конкретным типом используемой системы. На выходе любой из систем потребитель может иметь следующую информацию:

- координаты молниевых ударов;
- время молниевых ударов;
- продолжительность удара;
- силу удара (ток в канале);
- тип удара [облако – Земля (О-З) или облако – облако (О-О)];
- полярность;
- число разрядов во вспышке.

Современные вычислительные средства позволяют сохранять и производить анализ данных грозовой активности на значительном (ограниченном объеме памяти) временном интервале. Основными параметрами систем мониторинга грозовой активности являются вероятность обнаружения и точность определения координат молниевых разрядов, зависящие от конфигурации системы и типа применяемых датчиков.

Определение параметров молниевых разрядов производится из анализа временных, спектральных и пространственных характеристик формируемого в процессе обратного удара либо движения лидера радиоизлучения (атмосферика). В настоящее время наиболее распространены системы, использующие в качестве сенсоров многоканальные радиоприемные устройства диапазонов 1–500 кГц и 108–116 МГц [6]. Выбор диапазона частот 1–500 кГц обусловлен, с одной стороны, спектральным составом атмосферика, с другой – способностью радиоволн в данном диапазоне распространяться на значительные расстояния в канале Земля – ионосфера [3]. Датчики, использующие данный частотный диапазон, позволяют определять координаты молниевых разрядов на расстояниях, превышающих тысячи километров. Применение диапазона 108–116 МГц ограничивает дальность действия датчика прямой видимостью, но позволяет за счет отсутствия влияния поляризационных ошибок с высокой точностью вычислять координаты как О-З, так и О-О разрядов. Датчики данного типа одновременно фиксируют направление и время прихода атмосферика. Определение координат возможно при наличии данных от 3-4 датчиков.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

Определение координат молниевых ударов осуществляется тремя методами: угломерным, угломерно-дальномерным и разностно-дальномерным [7]. Основные характеристики этих методов приведены в табл. 1.

Наиболее точным методом определения координат является разностно-дальномерный. Системы, построенные на основе данного метода, позволяют оценивать координаты с погрешностью не хуже 1 км. Датчики разностно-дальномерных систем, как правило, анализируют сигнал лишь электрической составляющей излучения молниевых разрядов. Пространственно разнесенные датчики определяют время прихода атмосферика, которое отправляется в центр расчета координат. Точность определения координат определяется качеством временной синхронизации датчиков и геометрическим фактором системы. Минимальное число датчиков, необходимое для реализации разностно-дальномерной системы – четыре.

Датчики, позволяющие оценивать угол прихода радиоволны, объединяются в пеленгационную сеть. Характеристики пеленгационной сети обусловлены погрешностями определения

направления, расстоянием до молниевых ударов и взаимным расположением датчиков. Преимуществом пеленгационной системы является отсутствие необходимости применения высокоточной системы единого времени. Для расчета координат достаточно определить направление тремя датчиками.

Таблица 1

### Характеристики методов определения координат

Метод определения координат	Характеристики					
	Требуемое число датчиков	Дальность действия, км	Точность определения координат	Типы обнаруживаемых разрядов	Вероятность обнаружения	Сервер сбора и обработки данных
Разностно-дальномерный	Не менее 4	Более 1000	До 250 м внутри сети	О-О, О-З	Определяется конкретной реализацией	+
Угломерный	Не менее 3	Более 1000	10 % от дальности	О-О, О-З		+
Угломерно-дальномерный	1	До 100	10 % от дальности	О-О, О-З		-

Угломерно-дальномерная система требует наличия лишь одного датчика. Каналы связи и центр обработки информации в данном случае необходимы лишь для применения датчика в составе многопозиционных систем. В данном случае три датчика могут быть объединены в пеленгационную сеть. Кроме направления датчики этого типа оценивают дальность до молниевых разрядов по различиям спектров электрической и магнитной составляющих атмосферы либо более грубо, на основе измерения и анализа амплитуды принимаемого сигнала. Возможность определения координат одним датчиком повышает мобильность системы, что крайне важно для решения военно-прикладных задач. Несмотря на очевидные преимущества, данная система имеет серьезные ограничения. Так, дальность определения координат молниевых разрядов одним датчиком не может превышать 100 км. При этом точность на дальностях 0–20 км и 80–100 км несколько хуже, чем у пеленгационной системы.

## ДАТЧИКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ГРОВОЙ АКТИВНОСТИ

Датчики систем мониторинга грозовой активности в зависимости от реализуемого метода определения координат имеют различные схемы построения и характеристики. Вместе с тем аппаратные платформы датчиков, применяемых в угломерной и угломерно-дальномерной системах, мало отличаются. В том и другом случаях для определения направления используется одна вертикальная электрическая и две скрещенные магнитные антенны, а для усиления и фильтрации полезного сигнала – три идентичных канала приема, имеющие сопоставимые полосы пропускания. Основное различие заключается в алгоритмах обработки принимаемого сигнала. Дополнительно угломеры оснащаются средствами передачи данных и системой единого времени.

Датчики, применяемые в разностно-дальномерных системах, имеют в своем составе лишь электрическую антенну и один канал приема. Как и в датчиках угломерных систем, в состав также входит система временной синхронизации и передачи данных. Обобщенные характеристики датчиков приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Основные характеристики датчиков систем мониторинга грозовой активности

Датчик	Характеристики				
	Тип антенны	Число приемных каналов	Полоса пропускания, кГц	Временная синхронизация	Модем передачи данных
Угломерной сети	Е-Н	3	До 100	10 мкс	+
Угломерно-дальномерный	Е-Н	3	До 100	Не требуется	–
Разностно-дальномерной сети	Е	1	Более 100	100 нс	+

Из таблицы видно, что датчики различных типов имеют некоторые важные отличия. Так, в датчиках разностно-дальномерных систем для обеспечения высокой точности временной привязки атмосферика входные тракты стараются делать широкополосными. Датчики угломерных и угломерно-дальномерных систем не требуют широкой полосы. В связи с этим прямое использование датчиков угломерных и угломерно-дальномерных систем для определения времени прихода атмосферика сопряжено с дополнительными инструментальными ошибками. Работа изделий Верея-МР, LS7002 и TLS200 в сети позволяет реализовать угломерный и разностно-дальномерный методы определения координат.

Аппаратная платформа угломерно-дальномерных систем принципиально позволяет реализовать при работе в сети как угломерный, так и разностно-дальномерный методы определения координат. Создание единой аппаратной платформы для реализации различных типов датчиков позволит в значительной степени повысить гибкость систем мониторинга грозовой активности. Системы, построенные на универсальных датчиках, станут масштабируемыми, т. е. в зависимости от решаемых задач смогут реализовывать необходимые методы определения координат и других характеристик молниевых разрядов путем программной настройки. Эта возможность может быть реализована путем замены электронной части устройств на унифицированную, имеющую в своем составе цифровой вычислитель, реализующий требуемые алгоритмы, интерфейсы связи и систему временной синхронизации. Структурная схема такого датчика показана на рис. 1.

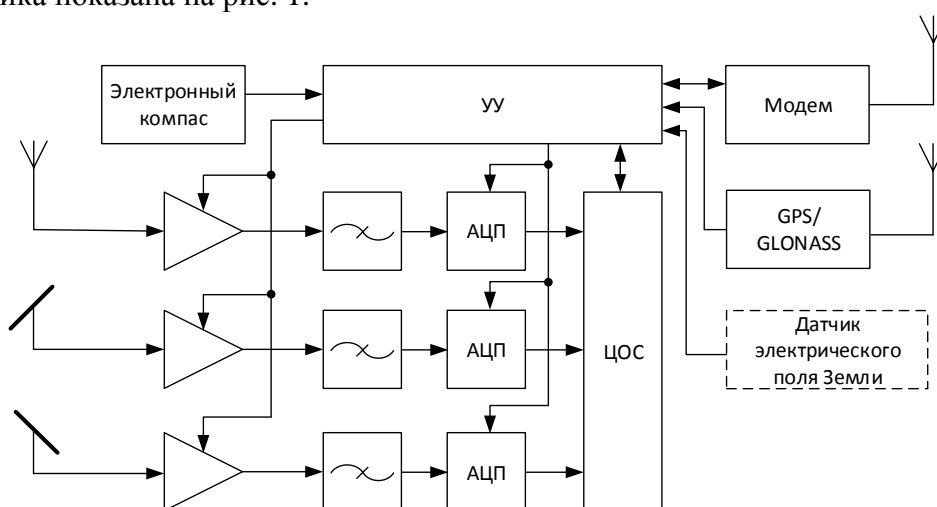


Рис. 1. Универсальная аппаратная платформа датчика систем мониторинга грозовой активности

Для оперативной конфигурации датчика в аппаратную платформу должны быть заложены механизмы удаленного контроля технического состояния датчика и обновления встроенного программного обеспечения. Полоса частот входных трактов должна обеспечивать требуемую скорость нарастания сигнала, а процессор цифровой обработки сигналов (ЦОС) – реализацию различных алгоритмов работы. Для обеспечения раннего предупреждения о грозовой опасности грозопеленгатор-дальномер, построенный на основе универсальной аппаратной платформы, может оснащаться датчиком напряженности электрического поля Земли. Анализ данных о текущих значениях электрического поля позволяет определить зарождающиеся очаги грозовой активности в районе установки датчика, обеспечивая тем самым заблаговременное предупреждение о начале грозовой деятельности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время имеется целый ряд систем и датчиков мониторинга грозовой активности, реализующих различные методы определения координат молниевых разрядов. Технические решения, положенные в основу этих датчиков, ограничивают возможности применения последних в случае изменения требований к системам мониторинга грозовой активности, построенных на их основе. Вместе с тем имеется принципиальная возможность реализации универсальной аппаратной платформы датчика грозовой активности. С учетом возможностей современной элементной базы функционал устройства в требуемой степени может определяться заложеной в него программой. Датчик, построенный на основе универсальной платформы, может быть оперативно сконфигурирован для решения задач конкретной сети либо автономной работы.

## Список используемых источников

1. *Панюков А.В., Багин Г.Т.* Применение систем пассивного мониторинга грозовой деятельности // Комплексная безопасность России – исследования, управление, опыт: международный симпозиум. – М., 2004. – С. 178–180.
2. Грозовая активность и ее мониторинг для нужд электроэнергетики. – URL: <http://www.namos.ru/press/publications/a34> (дата обращения: 03.02.2016).
3. *Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С.* Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 220 с.
4. Geostationary Operational Environmental Satellites – R Series. – URL: <http://www.goes-r.gov> (дата обращения: 03.02.2016).
5. TOA Systems, Inc. – URL: <http://www.toasystems.com> (дата обращения: 03.02.2016).
6. Vaisala Group. – URL: <http://www.vaisala.com> (дата обращения: 03.02.2016).
7. *Сайбель А.Г.* Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. – 56 с.
8. ООО «Цифровой Дракон». – URL: <http://www.digital-dragon.ru> (дата обращения: 03.02.2016).



А.Е. Дроздов,  
кандидат техн. наук;  
Н.Н. Жильцов  
ОАО «ГНИНГИ», г. Санкт-Петербург

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА

В статье изложены основные принципы создания системы мониторинга гидрометеорологической обстановки в океане в интересах Военно-морского флота (ВМФ), а также описано нынешнее состояние технических средств гидрометеорологического обеспечения и ближайшие перспективы их развития.

Ключевые слова: система гидрометеорологического обеспечения, мониторинг, информационно-измерительная система, технические средства, комплекс автономных измерительных устройств, дрейфующие буи.

### ВВЕДЕНИЕ

Основными принципами создания системы гидрометеорологического освещения (мониторинга) обстановки в океане в интересах Военно-морского флота (ВМФ) являются следующие:

- развертывание в океане сил и средств (специальных) для квазирегулярной сети точек (станций) измерений гидрометеорологических величин;
- проведение всех измерений в единые сроки и оперативная передача результатов измерений в центры сбора и обработки данных;
- проведение измерений стандартным набором технических средств с установленными метрологическими характеристиками.

Комплексный подход океанологического мониторинга предполагает разработку перспективных технологий дистанционного контроля и передачи информации в реальном масштабе времени при проведении оперативной гидрофизической и гидрометеорологической съемки.

Следует отметить, что система гидрометеорологического обеспечения ВМФ предусматривает мониторинг приоритетных (оперативно важных) районов Мирового океана и окраин морей, координацию деятельности научно-исследовательских технических средств и флотов РАН, Росгидромета и Минобороны России, а также создание оперативной общегосударственной системы информации об обстановке в Мировом океане. Хозяйственная деятельность человечества в океане неуклонно развивается, и Мировой океан в настоящее время рассматривается как важный источник ресурсов. Поэтому возрастает потребность в исследовании морских течений, дрейфа льдов, температуры воды и воздуха, ветра, атмосферного давления, морского волнения, то есть полном комплексе гидрометеорологического обеспечения.

В настоящее время совершенствование технических средств и методов изучения океана происходит в сложных условиях ужесточения требований к оперативности и достоверности гидрофизической и гидрометеорологической информации, с одной стороны, и резкого ограничения бюджетного финансирования – с другой. Первоначально изучение Мирового океана было ориентировано на использование научно-исследовательского флота страны. Однако довольно скоро пришло понимание, что выполнение такой программы с использованием подобных средств чрезвычайно дорого и продолжительно по времени. Выходом из сложившейся ситуации стало использование технологий спутниковой океанологии и дрейфующих океанографических станций-дрифтеров. Поэтому новая методология гидрометеорологического мониторинга XXI века предполагает комплексное использование четырех-

компонентной структуры технических средств берегового, надводного, подводного и спутникового базирования.

## СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКЕАНЕ

Схематично система освещения гидрометеорологической обстановки в океане показана на рис. 1. Надводная корабельная компонента появилась при непосредственном участии ОАО «ГНИНГИ» и в 2005 году была принята на снабжение ВМФ.



Рис. 1. Система освещения гидрометеорологической обстановки в океане

Корабельная автоматизированная информационно-измерительная система гидрометеорологического обеспечения безопасности полетов морской авиации представлена в трех модификациях:

1. «Касметео-К» (для кораблей с групповым базированием авиации), имеющая в своем составе:

- метеорологический радиолокатор;
- аппаратуру приема спутниковой информации;
- автоматическую метеорологическую станцию (АМС), обеспечивающую получение необходимых данных с характеристиками, приведенными в табл. 1;
- гидрологический зонд ОЛД-1, обеспечивающий получение необходимых данных с характеристиками, приведенными в табл. 2;

Таблица 1

### Параметры, измеряемые АМС

Наименование измеряемого параметра	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$
Метеорологические параметры		
Скорость ветра $W$ , м/с	От 1 до 60	$\pm (0,3 + 0,02W)$
Направление ветра, град	От 0 до 360	$\pm 2$ (при $W$ более 5 м/с)

Окончание табл. 1

Наименование измеряемого параметра	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$
Атмосферное давление, гПа	От 600 до 1080	$\pm 0,5$
Температура воздуха, °С	От -52 до 50	$\pm 0,3$
Относительная влажность воздуха при температуре воздуха от минус 20 °С до 50 °С, %	От 30 до 100	$\pm 5$
Высота нижней границы облаков $h$ , м	От 15 до 7500	$\pm (15 + 0,05h)$
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости $S$ , м (интерферометр)	От 10 до 20000	$\pm (10 + 0,1S)$
Метеорологическая (оптическая) дальность видимости $S$ , м (трансмиссометр)	От 70 до 7500	$\pm (10 + 0,1S)$

Таблица 2

**Параметры, измеряемые гидрологическим зондом ОЛД-1**

Гидрологические параметры		
Температура морской воды, °С	От -2 до 30	$\pm 0,03$ °С
Электрическая проводимость морской воды, отн. ед.	От 0 до 1,5	$\pm 1 \cdot 10^{-3}$
Гидростатическое давление, МПа	От 0 до 20	$\pm 0,01$

– пост «Дозор» для контроля температуры и влажности воздуха в погребах с боезапасом.

2. «Сюжет-КМ» (для кораблей с одиночным базированием авиации), имеющая в своем составе:

- аппаратуру приема спутниковой информации;
- АМС с измерением видимости и высоты облачности;
- гидрологический зонд ОЛД-1;
- пост «Дозор».

3. Гидрометеорологическая станция «Характер-К» (для кораблей и судов без авиации), имеющая в своем составе:

- АМС;
- гидрологический зонд ОЛД-1;
- пост «Дозор».

Для береговой компоненты в 2012 году была принята на снабжение ВС РФ комплексная автоматизированная информационно-измерительная система гидрометеорологического обеспечения безопасности полетов авиации ВМФ – «шифр «Касметео-К-Б» [1]. Эта система предназначена для оснащения метеорологических подразделений авиационных баз I и II порядков и подлежит включению в таблицы к штатам указанных воинских частей.

В настоящее время опытный образец установлен на аэродроме Левашово (Санкт-Петербург), планируется установка на следующих аэродромах:

- НИУТК КА в г. Ейске;
- Североморск-1;
- Североморск-3.

Более чем на 30 радиотехнических постах береговой системы наблюдения (РТП БСН) ВМФ установлены АМС «Характер-К». В дальнейшем планируется увеличение числа РТП БСН, оснащенных АМС данного типа.

Для повышения эффективности функционирования надводной, подводной и береговой компонент технических средств гидрометеорологического обеспечения ВМФ был разработан комплекс автономных средств гидрометеорологического обеспечения, состоящий из пяти подсистем:

1) подсистемы измерительной гидрометеорологической автономной ПИГМА-1, которая обеспечивает измерение метеорологических величин у поверхности воды, гидрологических параметров на глубине, а также сбор, обработку и передачу информации об измеренных гидрометеорологических величинах в диапазонах и с точностями, приведенными в табл. 3;

Таблица 3

### Параметры, измеряемые подсистемой ПИГМА-1

Наименование измеряемого параметра	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$
Метеорологические параметры		
Скорость ветра $W$ , м/с	От 1 до 50	$\pm (0,5 + 0,05W)$
Направление ветра, град	От 0 до 360	$\pm 6$ (при $W$ более 5 м/с)
Температура воздуха, °С	От -50 до 50	$\pm 0,5$
Атмосферное давление, гПа	От 880 до 1080	$\pm 0,5$
Гидрологические параметры		
Температура морской воды, °С	От -2 до 30	$\pm 0,03$ °С
Электрическая проводимость морской воды, отн. ед.	От 0 до 1,5	$\pm 1 \times 10^{-3}$
Скорость течения $V$ , м/с	От 0,02 до 1,5	$\pm (0,03 + 0,05V)$
Направление течения (отклонение от направления магнитного меридиана), град	От 0 до 360	$\pm 5$
Гидростатическое давление, МПа	От 0 до 2	$\pm 0,01$

2) подсистемы измерительной гидрологической автономной ПИГМА-2, обеспечивающей измерение гидрологических величин в морской воде, характеризующих состояние морской воды: температуру, электрическую проводимость (солености), скорость и направление течения по заданным горизонтам, параметры волнения моря, а также сбор, обработку и передачу информации о гидрологических величинах в диапазонах и с точностями, приведенными в табл. 4:

Таблица 4

### Параметры, измеряемые подсистемой ПИГМА-2

Наименование измеряемого параметра	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$
Высота волн, м	От 0 до 10	$\pm 10$ %
Диапазон измерения периода волн, с	от 1 до 30	$\pm 5$ %

Окончание табл. 4

Наименование измеряемого параметра	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$
Период измерения, мин	10	–
Температура морской воды, °С	от -2 до 30	$\pm 0,03^{\circ}\text{C}$
Электрическая проводимость морской воды, отн. ед.	от 0 до 1,5	$\pm 1 \times 10^{-3}$
Скорость течения $V$ , м/с	от 0,02 до 1,5	$\pm(0,03+0,05V)$
Направление течения (отклонение от направления магнитного меридиана), град	от 0 до 360	$\pm 5$
Гидростатическое давление, МПа	от 0 до 2	$\pm 0,01$

3) подсистемы измерительной гидрометеорологической автономной ПИГМА-3. Береговая ПИГМА-3 – автономная береговая автоматическая метеорологическая станция, обеспечивающая сбор, обработку и передачу информации о значениях гидрометеорологических величин в прибрежной зоне в диапазонах и с точностями, приведенными в табл. 3 для метеорологических параметров;

4) подсистемы получения информации и контроля работоспособности ППИ-1, обеспечивающей контроль работоспособности автономных измерительных подсистем ПИГМА-1, ПИГМА-2 и ПИГМА-3;

5) подсистемы получения информации ППИ-2, располагаемой в приемном центре, которая обеспечивает сбор измерительной информации от автономных подсистем и осуществляет необходимые вычисления.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Между тем в настоящее время далека от разрешения проблема создания полноценной системы освещения гидрометеорологической обстановки в Мировом океане. В этом смысле видятся следующие направления развития технологий и средств производства гидрометеорологических измерений, позволяющих в ближайшем будущем решить данную проблему.

1. Создание комплекса средств, осуществляющих мониторинг гидрологических величин на ходу корабля (судна) без ограничения его скорости. Получение прямого значения скорости звука в воде позволяет производить в режиме реального времени расчеты по определению дальности действия гидроакустических комплексов. Параллельно получаемые данные по температуре воды и электропроводности позволяют измерить скорость звука по всему разрезу более точным, расчетным способом и подтвердить достоверность прямых измерений, что значительно упростит метрологическое обеспечение комплекса и повысит его надежность.

2. Исследование возможности создания комплекса мониторинга гидрометеорологической обстановки на базе развертываемых дрейфующих гидрометеорологических буйковых станций. Создание дрейфующих гидрометеорологических буйковых комплексов с расширенной номенклатурой измеряемых гидрометеорологических параметров, с возможностью постановки как с корабля, так и с использованием авиации, позволит более полно учитывать фактор природной среды при обеспечении деятельности сил флота в любом районе Мирового океана. Перечень измеряемых буйковой станцией гидрометеорологических величин приведен ниже:

- атмосферное давление;
- температура воздуха;
- температура поверхности моря;
- скорость дрейфа;
- высота морских волн;
- период морских волн.

3. Исследование возможности создания автономного ледового буя для измерения и передачи по радиоспутниковому каналу связи гидрометеорологических, в том числе ледовых и гидроакустических характеристик.

Внедрение разработанного буя даст возможность расширить область действия системы мониторинга и прогнозирования морских акваторий, распространить ее в том числе и на Арктический регион. Это позволит повысить достоверность и точность определения гидрометеорологических величин, в том числе метеорологических, ледовых и гидрологических, удовлетворив современные требования по ГМО кораблей, судов ВМФ, и повысить достоверность краткосрочных прогнозов на 15÷20%, а также оперативность сбора и доведения гидрометеорологической информации до потребителей за счет использования спутниковых каналов связи.

4. Исследование возможности создания комплекса программно-аппаратных средств сбора, обработки и представления оперативной гидрометеорологической информации. Определение путей технической реализации создания комплекса программно-аппаратных средств для объединения разнородной гидрометеорологической информации.

5. Создание корабельного гидрометеорологического комплекса для перспективных проектов надводных кораблей, включающего в себя:

- гидрометеостанцию комплекса, обеспечивающую измерения метеорологических величин с помощью датчиков, размещаемых на надстройках корабля, и гидрологических величин с помощью возвращаемого или теряемого зондов;
- лидарно-радиолокационный комплекс, состоящий из доплеровского метеорологического радиолокатора, профилометра и лидара;
- аппаратуру автоматического аэрологического зондирования;
- аппаратуру приема гидрометеорологической спутниковой информации, получаемой от отечественных и зарубежных метеорологических космических аппаратов;
- средства приема, обработки и представления гидрометеорологической информации комплекса, поступающей от радиометеорологических центров, кораблей, судов, автономных гидрометеорологических буев и станций;
- комплекс программно-аппаратных средств обработки, накопления и доведения гидрометеорологической информации, представляющий собой специализированные автоматизированные рабочие места, созданные на базе приборов управления и индикации и специального программного обеспечения, работающий в режиме локальной вычислительной сети.

Выполнение названных актуальных на данный момент работ позволит решить проблему гидрометеорологического обеспечения ВМФ на современном уровне с учетом возросших требований разработчиков перспективных видов вооружения и военно-специальной техники.

### Список используемых источников

1. Состояние и принципы построения автоматизированных систем сбора, обработки и представления комплексной гидрометеорологической информации для обеспечения авиации, надводных кораблей, судов и береговых объектов ВМФ / А.Е. Дроздов, И.А. Готюр, Ю.В. Кулешов, С.С. Суворов, Г.Г. Щукин // Навигация и гидрография. – 2013. – № 36. – С. 87–96.

Д.С. Ефременко,  
О.С. Сероухова  
ФГБОУ ВО «РГГМУ», г. Санкт-Петербург

## **К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ДИСКРЕТНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

В статье исследуется влияние дискретности измерения температуры и влажности воздуха и атмосферного давления на значения таких статистических характеристик временных рядов, как среднее значение, среднее квадратическое отклонение, асимметрия и эксцесс, вид эмпирической функции распределения. При проведении расчетов использовались полученные с помощью автоматической метеорологической станции относительно короткие временные ряды длительностью 1–14 суток с дискретностью измерений от 10 с до 180 мин.

Ключевые слова: метеорологические величины, временные ряды, статистические характеристики временных рядов.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время на метеостанциях идет повсеместная замена ранее используемых средств измерения на автоматические метеорологические станции (АМС) и комплексы (АМК). Данные от таких станций становятся основным источником информации с наземных наблюдательных систем: в 2014 году сеть Росгидромета содержала 1813 АМС и АМК [1]. Помимо АМС сети Росгидромета для метеорологического обеспечения различных отраслей хозяйственной деятельности в настоящее время функционирует большое количество специализированных АМС: аэродромных, дорожных, лесных, экологических и др. [2, 3].

Общая особенность всех АМС состоит в том, что в процессе своего функционирования они формируют временные ряды метеорологических величин, имеющих весьма малую дискретность опроса датчиков (до  $10\div 20$  с), что делает важным исследование свойств таких временных метеорологических рядов по сравнению с данными неавтоматизированных метеорологических станций (дискретность наблюдений – 3 ч). Уменьшение дискретности приводит к сглаживанию временной изменчивости, к изменению положения локальных минимумов и максимумов и др. Все это, в свою очередь, может приводить и к изменению значений статистических характеристик временного ряда при изменении дискретности содержащихся в нем измерений.

В статье приводятся результаты исследования влияния величины дискретности измерения ( $\Delta t$ ) температуры воздуха, атмосферного давления, парциального давления водяного пара и относительной влажности воздуха на величину таких статистических характеристик временных рядов, как средние значения ( $M_0$ ), средние квадратические отклонения (СКО), асимметрия ( $A_s$ ) и эксцесс ( $E_x$ ), вид эмпирической функции распределения. При этом в процессе формирования временных рядов с разной дискретностью не проводились операции осреднения – каждый временной ряд строился простым выбором через нужные промежутки времени данных из ряда с меньшей дискретностью (дискретность исходного ряда всегда равнялась 10 с). Расчеты проводились для различных сезонов, и, кроме того, варьировалась длина временных рядов.

### **СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ И СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЕ ОТКЛОНЕНИЕ**

Анализ результатов расчета указанных статистических характеристик показал, что как средние значения, так и среднеквадратические отклонения испытывают заметную сезонную

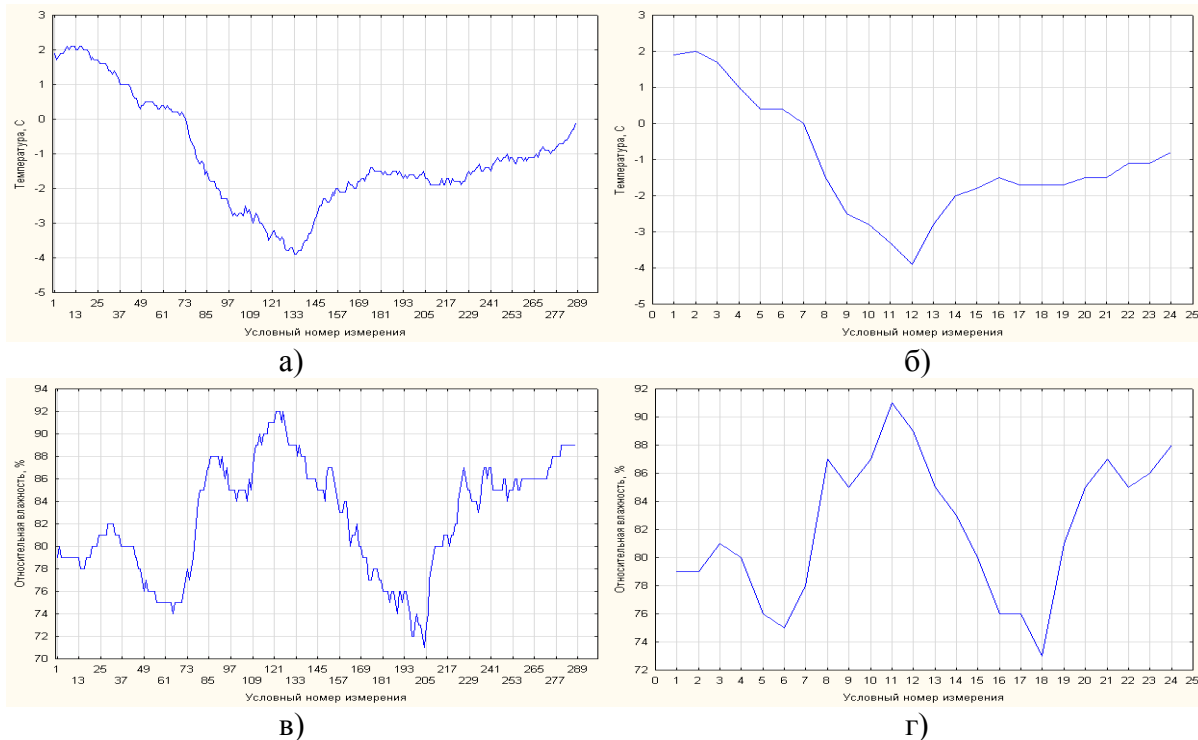
изменчивость. Однако для временных рядов длительностью более одних суток в диапазоне дискретности измерений от 10 с до 180 мин для всех сезонов величина среднего значения и среднеквадратичного отклонения практически не меняется (выявленные изменения статистически не значимы). В табл. 1 приведен пример результатов расчетов с использованием 7-суточных временных рядов для четырех сезонов.

*Таблица 1*

**Статистические характеристики временных рядов температуры ( $^{\circ}\text{C}$ )  
за январь, май, июль и октябрь за 7 суток 2014 года**

$\Delta t$ , мин	Январь		Май		Июль		Октябрь	
	Mo	СКО	Mo	СКО	Mo	СКО	Mo	СКО
1/6	0,5	1,9	5,3	2,2	17,2	3,2	8,8	2,5
15	0,5	1,9	5,3	2,2	17,2	3,3	8,8	2,5
180	0,5	1,9	5,3	2,3	17,2	3,3	8,8	2,6

Наблюдается зависимость значений математического ожидания и среднеквадратического отклонения от длины ряда. Однако по-прежнему величины рассматриваемых статистических характеристик в пределах одной длительности ряда практически не зависят от дискретности измерений  $\Delta t$  вплоть до значения в 180 мин (выявленные изменения статистически не значимы). Увеличение интервала между измерениями даже в 12 раз позволяет не пропустить основные тенденции изменения исследуемых временных рядов. Последнее иллюстрируют кривые на рис. 1.



*Рис. 1. Временной ряд температуры воздуха (а и б)  
и относительной влажности (в и г) с 01.01.2014 СПб за 3 суток:  
левые графики – дискретность 15 мин; правые графики – дискретность 180 мин*

**Вывод.** Анализ всех полученных данных показал, что средние значения и средние квадратические отклонения для временных рядов рассмотренных метеорологических величин зависят от рассматриваемого сезона и длительности выборки, но при этом практически не изме-



няются для одной и той же выборки в диапазоне изменения дискретности измерений от 10 с до 180 мин для всех рассмотренных сезонов при продолжительности временных рядов от 1 до 14 суток.

## АСИММЕТРИЯ И ЭКСЦЕСС

Такие статистические характеристики, как асимметрия  $As$  и эксцесс  $Ex$  количественно характеризуют особенности эмпирической функции распределения (ЭФР).

Проведенная серия расчетов показала, что как асимметрия, так и эксцесс могут менять свои значения от выборки к выборке и зависят, в свою очередь, от вида метеорологической величины, рассматриваемого сезона и объема выборки. В табл. 2 приведен пример результатов расчетов с использованием 7-суточных временных рядов для четырех сезонов.

Таблица 2

**Значения асимметрии и эксцесса для временных рядов температуры за январь, май, июль и октябрь за 7 суток 2014 года**

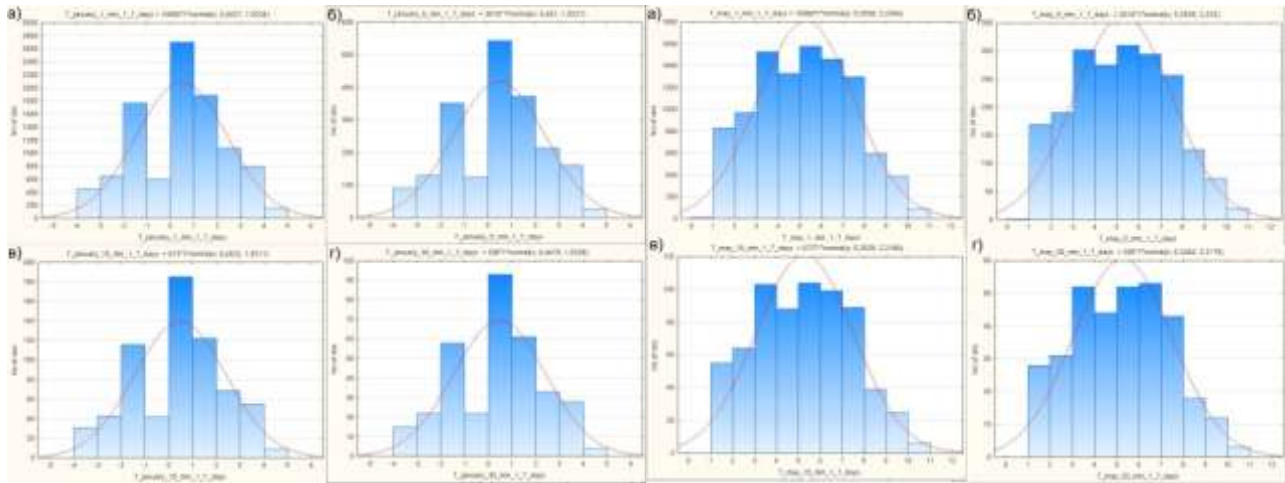
$\Delta t$ , мин	Январь		Май		Июль		Октябрь	
	$As$	$Ex$	$As$	$Ex$	$As$	$Ex$	$As$	$Ex$
1/6	-0,2	-0,6	0,1	-0,8	0,9	-0,04	-0,5	0,4
15	-0,2	-0,6	0,1	-0,8	0,9	-0,05	-0,5	0,4
180	-0,2	-0,5	0,1	-0,9	0,9	-0,01	-0,5	0,4

**Вывод.** Проведенные расчеты показали, что с изменением дискретности в диапазоне от 10 с до 180 мин значения асимметрии и эксцесса практически не меняются при длительности рядов рассмотренных метеорологических величин в 3 и более суток. При сокращении длительности ряда зависимость от дискретности может проявляться, начиная со значения в 60 мин.

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

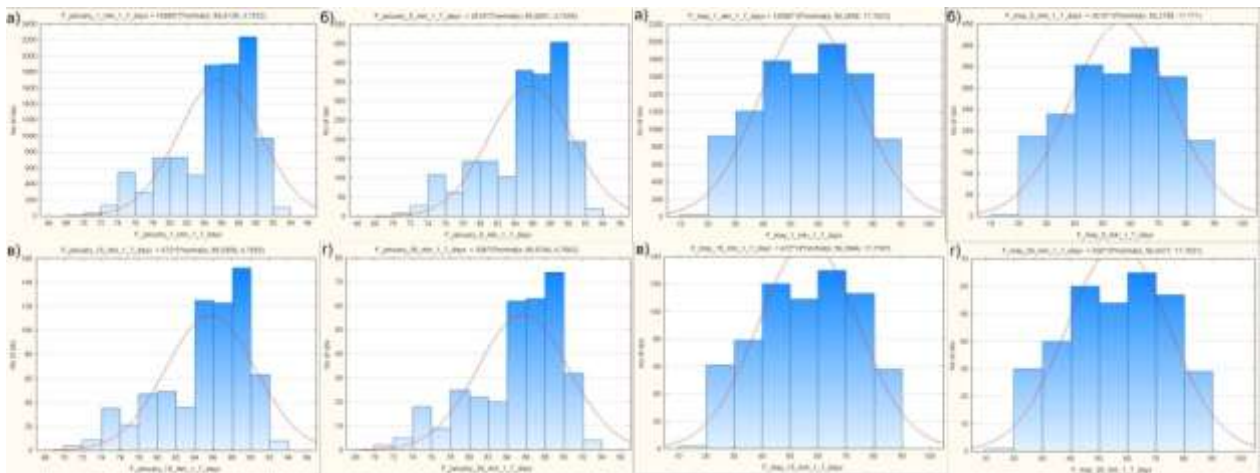
Графически эмпирическая функция распределения (ЭФР) метеорологической величины для заданного отрезка временного ряда может быть представлена в форме гистограммы. Именно такое представление и использовалось в данной работе для анализа влияния дискретности измерений на вид ЭФР. Анализ полученных данных показал большое разнообразие форм ЭФР. Эти формы меняются как при переходе от одного метеорологического параметра к другому, так и для одного и того же параметра, но для разных выборок. Наблюдаются одномодальные и двухмодальные распределения, заметно смещение распределения относительно среднего значения и др. На рис. 2 приведены примеры гистограмм для четырех метеорологических величин. Каждый блок содержит 4 гистограммы, построенных соответственно для дискретности измерений 1 (а), 5 (б), 15 (в) и 30 (г) мин. Блоки 1, 3, 5 и 7 соответствуют данным за 1–7 января 2014 года, блоки 2, 4, 6 и 8 – данным за 1–7 числа мая 2014 года. На каждой гистограмме приведена аппроксимационная кривая нормального распределения.

**Вывод.** В диапазоне дискретности измерений 1÷30 мин и временной протяженности выборок до 7 суток дискретность измерений не влияет на вид ЭФР. При этом следует учесть результаты, полученные при сокращении длительности ряда до 1 суток. Для таких коротких временных рядов можно ожидать зависимость вида ЭФР от величины дискретности.



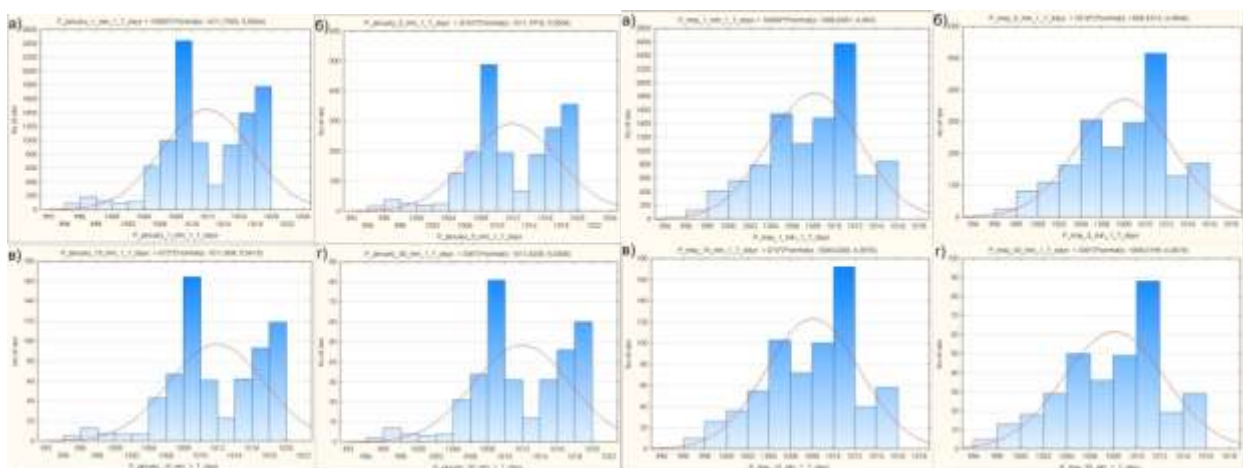
1) температура, январь

2) температура, май



3) относительная влажность, январь

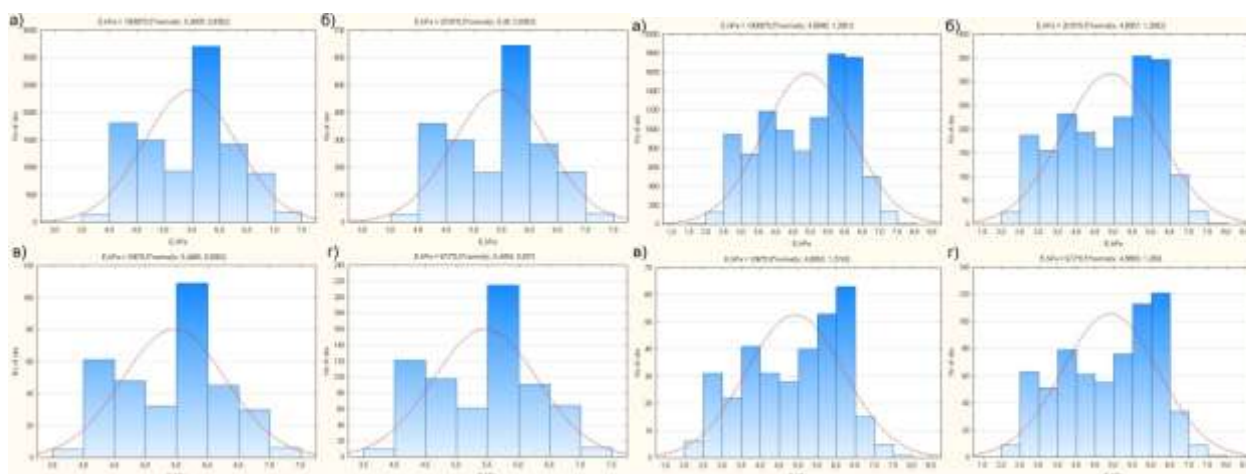
4) относительная влажность, май



5) давление, январь

6) давление, май

Рис. 2. Гистограммы распределения значений температуры воздуха (1 и 2), относительной влажности (3 и 4), атмосферного давления (5 и 6) и парциального давления водяного пара (блоки 7 и 8) (начало)



7) парциальное давление, январь

8) парциальное давление, май

Рис. 2. Гистограммы распределения значений температуры воздуха (1 и 2), относительной влажности (3 и 4), атмосферного давления (5 и 6) и парциального давления водяного пара (блоки 7 и 8) (окончание)

### Список используемых источников

1. Итоги состояния и функционирования автоматизированной метеорологической и актинометрической сетей в 2014 году / С.Ю. Гаврилова, Т.А. Иванова, Л.В. Луцько, О.А. Мясникова // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2015. – Вып. 577. – С. 7–33.
2. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции: учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2015. – Ч. 1: Тактико-технические характеристики. – 127 с.
3. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции: учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2015. – Ч. 2: Цифровая обработка данных автоматических метеорологических станций. – 80 с.
4. К вопросу о выделении аддитивных составляющих временного ряда приземной температуры воздуха / К.Л. Восканян, А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, Т.Е. Симаккина // Ученые записки РГГМУ. – 2013. – № 32. – С. 55–65.

А.И. Захаров<sup>\*</sup>,  
доктор физико-математических наук;  
А.А. Калинин<sup>\*\*</sup>,  
кандидат физико-математических наук;  
Б.Г. Кутуза<sup>\*\*</sup>,  
доктор физико-математических наук, профессор;  
Ю.В. Смирнов<sup>\*\*\*</sup>;  
В.И. Стасевич<sup>\*\*\*\*</sup>,  
кандидат физико-математических наук;  
В.Э. Турук<sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
кандидат техн. наук

<sup>\*</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино.

<sup>\*\*</sup> Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва.

<sup>\*\*\*</sup> ПАО РКК «Энергия».

<sup>\*\*\*\*</sup> ОАО «НПП "РОБИС"».

<sup>\*\*\*\*\*</sup> АО «Концерн радиостроения "ВЕГА"».

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ Р-ДИАПАЗОНА В КОМПЛЕКСЕ С РАДИОЛОКАТОРОМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ L/S-ДИАПАЗОНОВ

Рассмотрены возможности использования двухчастотных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), одновременно работающих в **Р**- и в **L**- или **S**-диапазонах длин волн. Приведены требуемые характеристики РСА. Показаны преимущества двухчастотных радиолокационных измерений в выбранных диапазонах длин волн, что связано с улучшением интерпретации данных, а также уменьшением влияния ионосферы. Задачи поверхностного и подповерхностного зондирования с помощью предлагаемого комплекса РСА включают исследование растительных, ледовых и почвенных покровов.

Ключевые слова: РСА **Р**- и **S**-диапазонов длин волн, влияние ионосферы, зеркальная гибридная антенна, исследование растительных, ледовых, почвенных покровов.

Создание космического радиолокатора с синтезированной апертурой **Р**-диапазона дает возможность получить эффективный инструмент для решения актуальных проблем лесного хозяйства, геологии, океанологии, подповерхностного зондирования в глобальных масштабах и на гораздо более высоком уровне в силу большего проникновения сигнала этого длинноволнового диапазона.

В настоящее время самолетные РСА **Р**-диапазона активно используются в России, Германии, Франции, Швеции и других странах для исследования природных ресурсов. Большое внимание уделяется использованию самолетных РСА этого диапазона для изучения влажности почв, биометрических и влажностных характеристик леса, сельскохозяйственных культур, морских льдов, снежного покрова и др. Идея создания космического РСА **Р**-диапазона активно обсуждается в последние 15 лет. Одним из наиболее известных и наиболее продвинутых проектов с использованием радаров этого диапазона является проект *Biomass*, поддерживаемый ЕКА и находящийся на стадии реализации [1]. В России также идет проработка вопроса создания подобного радара [2]. В этом проекте радар **Р**-диапазона планируется установить на борт международной космической станции (МКС).

Опыт эксплуатации РСА показывает, что значительное число задач дистанционного зондирования Земли целесообразнее решать с использованием РСА различных частотных диапазонов вследствие различной проникающей способности сигналов в зондируемые среды и чувствительности к шероховатости поверхности разного масштаба. Это приводит к мысли одновременного использования в проекте радара **Р**-диапазона, планируемого для установки

на борт МКС, второго диапазона длин волн. В качестве антенного устройства рассматривается гибридно-зеркальная антенна разработки ОКБ МЭИ, которая использовалась на борту малого аппарата «Кондор-Э» [3], и прошла успешные испытания в 2013 году. На рис. 1 изображена гибридная зеркальная антенна РСА для космического аппарата «Кондор-Э». В случае проведения космического эксперимента с РСА Р-диапазона вопрос выбора второго частотного диапазона в дополнение к Р-диапазону является весьма сложным. С одной стороны, имея в виду приоритетность исследования природных, растительных покровов, это не должен быть слишком коротковолновый диапазон. С другой стороны, второй диапазон можно было бы использовать для оценки влияния неоднородной, нестатической ионосферы Земли на технические характеристики РСА Р-диапазона (например, на пространственную разрешающую способность). Следует отметить, что, несмотря на то, что большее разнесение частот может быть более информативно с точки зрения большего круга задач дистанционного зондирования, оно усложняет вопрос интерпретации результатов мало изученного Р-диапазона при использовании его с космического аппарата.

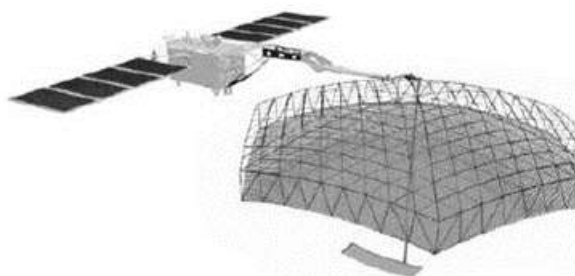


Рис. 1. Гибридная зеркальная антенна РСА для малого космического аппарата «Кондор-Э»

На рис. 2 представлены радиолокационные изображения морской поверхности, а на рис. 3,а,б территории с наличием разнообразных объектов, включая лесные массивы, торфяные разрабатки, поселки, поймы реки и т. д. [4].

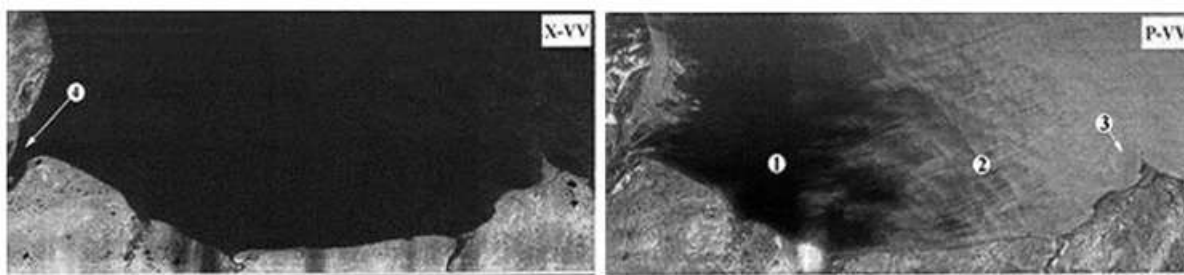


Рис. 2. Радиолокационные изображения участка Баренцева моря, полученные одновременно в диапазонах  $\lambda=4$  см (VV поляризация),  $\lambda=68$  см (VV поляризация):  
1 – район моря с различной соленостью; 2 – область волнения; 3 – вихрь за утесом;  
4 – устье реки

Анализ показывает, что использование L-диапазона в качестве второго диапазона важно для объяснения особенностей отражения сосновых лесов в зимнее время года. Однако S-диапазон может оказаться более перспективным, так как разрешенный для использования частотный диапазон позволяет получать более высокую пространственную разрешающую способность при меньшем влиянии ионосферы на результаты зондирования. В виду того, что к настоящему времени отработаны технологии изготовления зеркально-гибридной антенны и

радиолокатора S-диапазона, наиболее перспективным представляется использование 2-частотного РСА Р- и S-диапазонов.

Совместное использование данных S- и Р-диапазонов является интересной комбинацией вследствие существенных различий во взаимодействии сигналов этих диапазонов с зондируемыми средами, а также средой прохождения сигнала, ионосферой.

Задачи природопользования предполагают зондирование подстилающих покровов с проникновением в подповерхностные слои. Данные S- и Р-диапазонов предпочтительны для исследования растительных покровов, лесных массивов. Вследствие различия в глубине прохождения сигналов можно более полно изучать высотную структуру лесной растительности, более полно измерять биомассу леса, а также методами интерферометрии измерять толщину растительного слоя.

В области *исследования растительных покровов*, таких как лесные массивы, при использовании данных упомянутых двух частотных диапазонов можно более надежно проводить классификацию типов лесов, измерения биомассы растительности вследствие большей проникающей способности радиоволн Р-диапазона под кроны деревьев и регистрации отражения от стволов и крупных ветвей. При этом обеспечивается изучение состояния почвы под лесными покровами, контроль степени влажности и обнаружение подтоплений, в то время как в S-диапазоне происходит отражение от кроны и сравнительно мелких веток.

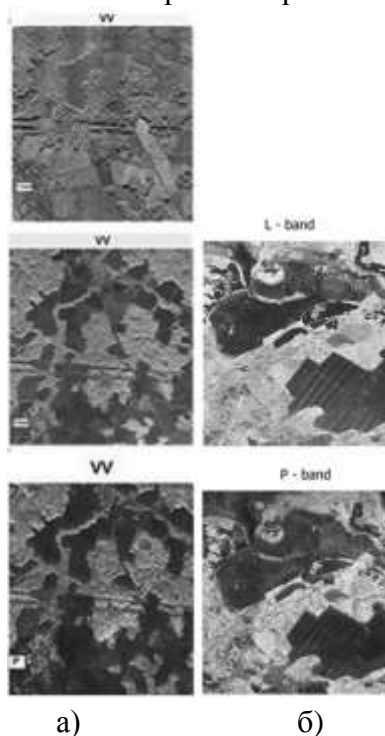


Рис. 3. Радиолокационные изображения территории с наличием разнообразных объектов, включая лесные массивы, торфяные разработки, поселки, пойму реки

Оценка параметров *состояния почв* в хозяйственной деятельности, таких как влажность, также более надежно осуществляется в Р-диапазоне вследствие меньшего влияния растительности и большей глубины подповерхностного зондирования, хотя классификация типов ландшафтов по степени мелкомасштабной шероховатости поверхности (масштаба длины волны несущей) предпочтительна в S-диапазоне, где почти все типы поверхности являются шероховатыми в разной степени.

В *геологии* в Р-диапазоне возможно наблюдать геологические структуры под осадочными слоями, а также растительными покровами. По этой же причине в этом диапазоне более информативно изучение засушливых, пустынных районов.

В *гидрологии* длинноволновый диапазон предпочтителен при изучении влажности подстилающих покровов вследствие меньшего влияния шероховатости поверхности почв и чувствительности к влажности большего по толщине поверхностного слоя. Более надежно выделяются водоемы вследствие меньшего влияния ветровой ряби на водной поверхности. В то же время картины крупномасштабного волнения, очищенного от ветрового волнения, лучше наблюдать в Р-диапазоне. Исследование зон подтоплений и их динамики в областях, покрытых лесом, также лучше реализуется в Р-диапазоне вследствие прохождения радиоволны сквозь толщу леса.

В *гляциологии* Р-диапазон лучше обеспечивает изучение структуры ледовых покровов мелководных пресноводных бассейнов вследствие проникновения сигнала сквозь толщу льда и взаимодействия с донным рельефом, однако для классификации типов морского льда более предпочтительны данные S-диапазона вследствие большей близости масштаба шероховатостей льда к длине волны. Изучение ледников и структур ледниковых покровов под снежными покровами, зон вечной мерзлоты также предпочтительнее проводить в Р-диапазоне.

При *интерферометрической съемке поверхности* с повторяющихся орбит Р-диапазон обеспечивает меньшую чувствительность измерений к временной декорреляции отраженного радиосигнала, особенно при больших интервалах между съемками, когда измерения на более коротких волнах практически невозможны.

При *исследовании влияния атмосферы* использование данных S- и Р-диапазонов позволит исследовать деструктивное влияние ионосферы на синтез радиолокационных изображений, а также отработать алгоритмы компенсации эффектов расфокусировки изображений, Фараде-евского вращения плоскости поляризации, а также нежелательных фазовых сдвигов, искажающих интерферометрические измерения рельефа.

Технические характеристики.

Гибридная зеркальная антенна с рефлектором раскрывается в космосе. Апертура рефлектора имеет форму шестигранника с расстоянием между гранями 6 м. Фокусное расстояние рефлектора – 4 м. Для двухдиапазонной РСА облучатель рефлектора выполнен в виде трех линейных антенных решеток, направленных горизонтально и расположенных в фокальной плоскости рефлектора.

Назовем технические характеристики комбинированного антенного устройства (АУ) Р- и S-диапазонов:

диапазон рабочих частот в диапазоне Р, МГц.....	432 ± 30;
диапазон рабочих частот в диапазоне S, МГц.....	3150 ± 100;
ширина ДН в вертикальной плоскости в Р диапазоне, град .....	7,5;
ширина ДН в вертикальной плоскости в S диапазоне, град.....	2;
сектор сканирования в вертикальной плоскости в Р диапазоне, град.....	± 7;
сектор сканирования в вертикальной плоскости в S диапазоне, град.....	± 5;
импульсная мощность в Р диапазоне, Вт.....	500;
импульсная мощность в S диапазоне, Вт.....	600.

Антенное устройство РСА ИРЭ может быть выполнено в виде гибридной зеркальной антенны с рефлектором, раскрываемым в космосе, и облучателем в виде коммутируемой антенной решетки. Апертура рефлектора имеет форму шестигранника с расстоянием между гранями 6 м. Фокусное расстояние рефлектора – 4 м. Рефлектор выполнен в виде ферменной конструкции стержней и шарнирных соединений с закрепленной в узловых точках фермы отражающей поверхности в виде трикотажного полотна из микропроволоки. В сложенном положении рефлектор имеет габариты: длина 1280 мм, поперечное сечение 744×720 мм. Масса рефлектора составляет 63,5±1,7 кг. Облучатель имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Габариты облучателя в сложенном состоянии: длина 1400 мм, ширина 600 мм, глу-

бина 300 мм. В раскрытом рабочем положении длина облучателя увеличивается до 2800 мм, глубина уменьшается до 150 мм. Масса облучателя – 25 кг, электропотребление – 5 Вт.

Электрические параметры антенного устройства РСА ИРЭ:

- коэффициент усиления – 25 дБ;
- сектор сканирования луча в горизонтальной плоскости (по уровню –3 дБ) – 31,5°;
- уровень пересечения соседних лучей –1,5 дБ.

#### **Список используемых источников**

1. Scipal, at all “The Biomass Mission – an ESA Earth Explorer Candidate to measure the Biomass of the Earth’s Forests”, IGARSS 2010 // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – P. 52–55.

2 Space experiment on the International Space Station with P-band SAR. / B. Kutuza, A. Kalinkevich, A. Zakharov, V. Stasevich, Yu. Smirnov // EUSAR-2014 Conference, Berlin, Germany, 02-06 June, 2014.

3. Choice of engineering performances in designing multipurpose synthetic aperture radar for small satellites EUSAR 2002 / LB. Neronskiy, I.O. Osipov, V.E. Turuk, V.I. Andrianov, I.O. Porokhov.

4. ISTC Project № 2866. Application of multi-frequency polarimetric synthetic aperture radar at decimeter) L,P0 and meter (VHF) bands for surface and subsurface sensing of soils and vegetation covers.



В.В. Калинин\*,  
кандидат физико-математических наук;

А.В. Тертышников\*\*,  
доктор техн. наук;

В.В. Удриш\*\*

\* Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань.

\*\* МО РФ, г. Москва.

## **ЗОНДИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА РАДИОСИГНАЛАМИ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ И ИОНОСФЕРЫ В НАЛЬЧИКЕ В МАРТЕ – МАЕ 2015 ГОДА**

Представлены результаты зондирования интегрального содержания водяного пара (ИСП) в вертикальном столбе атмосферы радиосигналами Глобальных навигационных спутниковых систем в Нальчике в марте – мае 2015 года. Приведены сопутствующие результаты зондирования ионосферы с калибровкой по модели IRI-2011.

Ключевые слова: тропосферная задержка, водяной пар, ионосферная задержка, ионосфера, ГЛОНАСС, GPS, содержание электронов, технология, модель, магнитная буря.

Радиосигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) успешно применяются для зондирования интегрального содержания водяного пара в атмосфере (ИСП или IWV) [1, 2]. Этот параметр обычно выражается в миллиметрах высоты столба жидкой воды, которая образовалась бы при полной конденсации пара в вертикальном столбе атмосферы.

Преимуществом зондирования ИСП по сигналам ГНСС является оперативность, дешевизна, возможность получать результаты днем и ночью, всепогодность, так как ГНСС работают в дециметровом диапазоне радиоволн, вследствие чего на их сигналы практически не влияют аэрозоли, облака и осадки [3].

В марте – мае 2015 года для исследования возможностей ГНСС для зондирования ИСП в атмосфере в Приэльбрусье проводились эксперименты с приемом сигналов космических аппаратов (КА) ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Навигационный приемник был установлен в Нальчике на крыше ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (Росгидромет). Принимаемые характеристики сигналов ГНСС обрабатывались авторским методом [1, 4], а также приложением TropoGNSS [5] для определения зенитной тропосферной задержки, ИСП и масштаба высоты вертикального профиля плотности водяного пара. Эти характеристики интересны для прогноза метеорологических условий в системе аэрологического, гидрометеорологического и геофизического обеспечения ВС РФ.

Навигационный приемник в эксперименте был настроен на зондирование через каждые 10 с. Рассчитанные оценки ИСП (в мм) над Нальчиком через каждые 5 мин представлены на рис. 1.

На рис. 1 заметно влияние на показатели ИСП затяжной весны 2015 года в Приэльбрусье и очевидная тенденция увеличения оценок ИСП после непальского землетрясения 25.04.2015 в связи с перестройкой атмосферной циркуляции. Сильные землетрясения часто сигнализируют об этом [6, 7].

Среднемесячные величины ИСП над Нальчиком составили 10,8 мм в марте, 12,7 мм в апреле и 20,8 мм в мае. Соответствующие среднемесячные значения приземной плотности водяного пара: 5,5 г/м<sup>3</sup>, 5,8 г/м<sup>3</sup> и 9,5 г/м<sup>3</sup>.

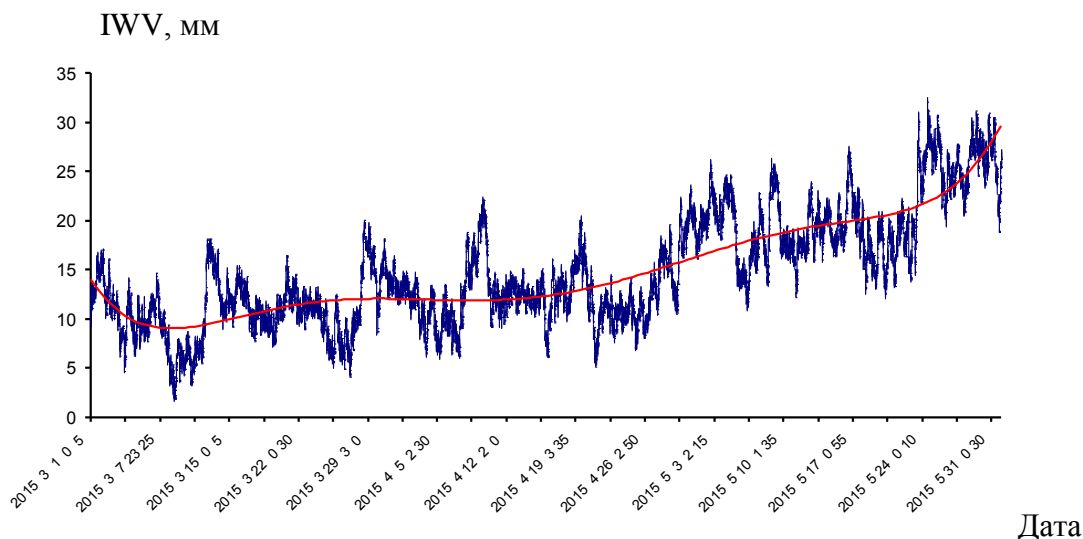


Рис. 1. Изменение ИСП (в мм) в марте – мае 2015 года над Нальчиком с аппроксимирующей кривой на основе полинома 6-го порядка

ИСП в мае выросло в 1,9 раз по сравнению с мартом, тогда как приземная плотность водяного пара только в 1,7 раз. При этом стандартное отклонение среднемесячных значений ИСП составило 3,2 мм в марте и апреле и 4,2 мм в мае.

Верификация и валидация приложения TproGNSS проводилась в Среднем Поволжье по данным радиозондирования атмосферы. Для ИСП сравнение показало согласие на уровне 2,0 мм осажденной воды в режиме постобработки. Для режима реального времени согласие снижается в полтора-два раза [8].

В Нальчике нет аэрологических станций. Поэтому полученные в ходе эксперимента оценки сравнивались с данными расчетов полей ECMWF [8]. Согласие с ними оценено на уровне 3,5 мм.

По полученным в Нальчике данным, как и в Среднем Поволжье, наблюдается отрицательная корреляция ИСП с приземным давлением атмосферы, что объяснимо большим запасом влаги в циклонах. Корреляция ИСП с приземной температурой достаточно выраженная и положительная. Можно также отметить соответствие между максимумами ИСП и режимом осадков на метеостанции Нальчик (рис. 2).

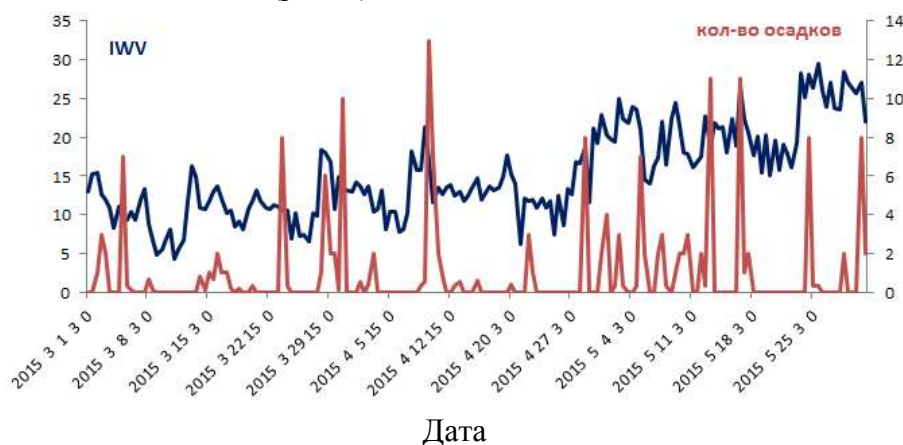


Рис. 2. ИСП (IWV) (в мм) в вертикальном столбе атмосферы и количество осадков над Нальчиком (в мм). Временной шаг 12 ч

Резкие всплески интегрального ИСП обычно соответствуют прохождению атмосферных фронтов и ливневым осадкам. Суточная амплитуда интегрального содержания составляет 1,2 мм, при этом максимум приходится на 19,3 ч местного среднесолнечного времени, тогда как минимум – на 9,8 ч (рис. 3).

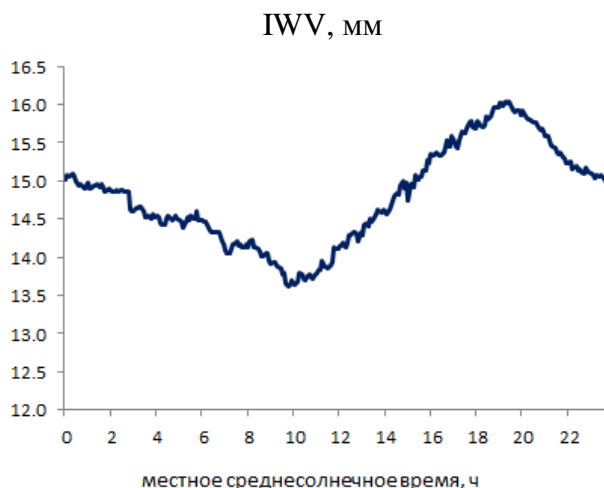


Рис. 3. Осредненный суточный ход ИСП (в мм) за март – май 2015 года над Нальчиком

Суточный ход приземной плотности водяного пара не повторяет ход ИСП. Последнее приводит к тому, что суточный ход масштаба высоты водяного пара (отношение ИСП к приземной плотности) имеет хорошо выраженный двугорбый характер. Масштаб высоты имеет первый максимум 2,20 км в 2,7 ч, затем снижается до 1,97 км в 9,8 ч и далее вновь растет до 2,22 км 17,8 ч. Второй минимум приходится на 22,2 ч и выражен слабо со значением масштаба высоты 2,12 км. Причины такого характера суточного хода объясняются локальной конвекцией водяного пара.

Интегральное содержание электронов в вертикальном столбе атмосферы (ПЭС) над Нальчиком (фактически плотность ионосферы) в ходе эксперимента до мая и перед непальским землетрясением росло (рис. 4).

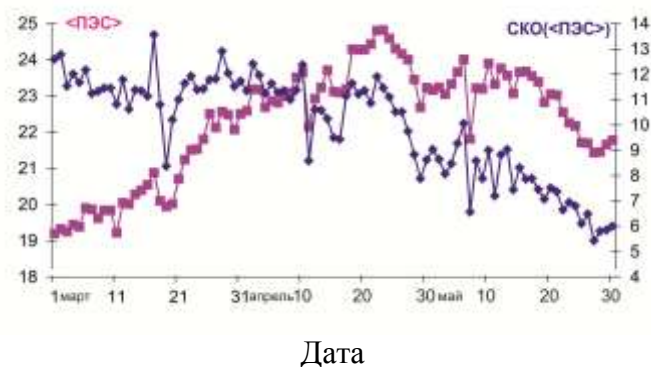


Рис. 4. Среднесуточные оценки ПЭС над Нальчиком с оценками среднеквадратического отклонения

Калибровка измерений проведена по модели IRI-2011 [9].

Сильная магнитная буря 17.03.2015 [10] и возмущения Кр-индекса (рис. 5) [11, 12] в апреле и мае проявились в вариациях ПЭС.

Связи ИСП с Кр-индексом не обнаружено.

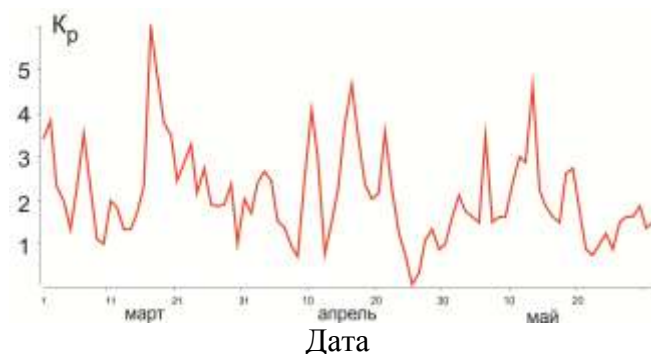


Рис. 5. Оценки планетарного Kp-индекса

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе эксперимента в марте – мае 2015 года в Нальчике отработана технология зондирования ИСП по радиосигналам ГНСС, а также технология зондирования ионосферы.

Наблюдается отрицательная корреляция ИСП с приземным давлением атмосферы и положительная корреляция с приземной температурой. Отмечено соответствие максимумов ИСП с режимом осадков на метеостанции Нальчик, а также с типом воздушных масс. Выявлен суточный ход ИСП.

Приведены сопутствующие результаты зондирования ионосферы с калибровкой по модели IRI-2011. Отмечен длительный рост ПЭС перед сильным непальским землетрясением 25.04.2015.

## Список используемых источников

1. Тertyшников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информация и космос. – 2010. – № 1. – С. 100–105.
2. Mendes V. B. Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques, Tech. Report № 199. – New Brunswick, UNB, 1999. – 353 p.
3. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates / Solheim F.S., Vivekanandan J., Ware R.H., et al. // JGR. – 1999. – Vol. 104, D8. – P. 9663–9670.
4. Пат. 2011128236 Российская Федерация. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации / Тertyшников А.В., Пулинец С.А. – Заявл. 07.07.2011; опубл. 01.02.2013, Бюл. № 4.
5. Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ. № 2014614454. ТропоGNSS: оценка зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн по сигналам ГНСС / Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. – Опубл. 24.04.2014.
6. Тertyшников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000. – 304 с.
7. Тertyшников А.В. Предвестники землетрясений и особенности их регистрации. – СПб.: ВИКА, 1996. – 128 с.
8. Калинин В.В. Восстановление интегрального влагосодержания атмосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем: автореферат диссертации. – Казань: КГУ, 2013. – 18 с.

9. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619293 Программа расчета относительных значений полного электронного содержания по характеристикам ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo. ФИПС / Глухов Я.В. – Оpubл. 01.10.2013.
10. *Тертышников А.В.* Эффект магнитной бури 17.03.2015 г. в полном электронном содержании ионосферы над Эльбрусом // Гелиогеофизические исследования. 2015. – Вып. 12. – С. 29–33. – URL: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=303> (дата обращения: 23.03.2016).
11. Магнитные индексы: учебное пособие / А.В. Тертышников, В.Б. Лапшин, А.В. Сыроешкин и др. – Москва-Обнинск, 2013. – 178 с.
12. *Тертышников А.В.* Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666> (дата обращения: 17.05.2016).

А.В. Карелин\*,  
*доктор физико-математических наук, доцент;*

В.П. Саворский\*\*,  
*кандидат физико-математических наук;*

Р.С. Салихов\*\*\*,  
*кандидат техн. наук;*

М.Т. Смирнов\*\*,  
*кандидат физико-математических наук;*

М.В. Гуманов\*\*\*

\* ФГУП ЦНИИмаш, г. Королёв.

\*\* Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино.

\*\*\* Научно-исследовательский институт электромеханики, г. Истра.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Рассматривается создание уникальной космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций, обеспечивающей проведение спутникового всепогодного круглосуточного глобального мониторинга Земли, позволяющего наблюдать изменчивость полей гидрометеорологических параметров с пространственным разрешением порядка 1 км. В основе ее лежит использование шести перспективных температурно-влажностных СВЧ радиометрических модулей, обеспечивающих восстановление температурно-влажностных профилей с вертикальным разрешением не хуже 1 км и с горизонтальным разрешением 1 км.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, космическая система, дистанционное зондирование Земли, мониторинг, СВЧ радиометр.

В статье рассматриваются перспективы создания уникальной космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций, обеспечивающей проведение спутникового всепогодного круглосуточного глобального мониторинга Земли, позволяющего наблюдать изменчивость полей гидрометеорологических параметров с пространственным разрешением порядка 1 км. В основе ее лежит использование шести перспективных температурно-влажностных сверхвысокочастотных (СВЧ) радиометрических модулей, обеспечивающих восстановление температурно-влажностных профилей с вертикальным разрешением не хуже 1 км и с горизонтальным разрешением 1 км.

Предлагаются следующие варианты построения перспективной космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций (ЧС) в зависимости от компоновки целевой аппаратуры:

1) вариант системы с максимально возможным набором информационных приборов, обладающих оптимальными массогабаритными характеристиками, энергопотреблением и пропускной способностью канала связи КА;

2) вариант системы, состоящий из проблемно-ориентированных МКА и КК для выполнения следующих задач:

- обнаружения пожаров;
- контроля за наводнениями;
- контроля за радиационной обстановкой;
- для комплексной оценки ущерба от ЧС;
- контроля за особо важными объектами инфраструктуры;
- мониторинга сейсмоопасных зон с целью краткосрочного прогноза землетрясений;

3) вариант комплексных систем (модулей) на основе целевой аппаратуры по решению задач мониторинга ЧС, требующих однотипных данных.

В качестве предложений по КА мониторинга ЧС рациональным является создание двух типов аппаратов:

- многофункциональных КА с ВИД (ПХ и МС), ИК, ГСК, СВЧ аппаратурой;
- сейсмопрогнозных КА с аппаратурой для геофизического мониторинга.

На первый план выступает вопрос минимизации затрат при создании новых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в том числе КК мониторинга ЧС. Предлагается в максимальной степени использовать возможности МКА «Канопус-В» и его модификаций.

При проектировании перспективной космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций был проведен анализ технических возможностей создания комплекса перспективной бортовой аппаратуры СВЧ диапазона в модульном исполнении для космических аппаратов оперативного наблюдения, исследованы возможности оптимального комплексирования спутниковых СВЧ приборов с оптико-электронной аппаратурой ДЗЗ с целью повышения надежности и точности измерения гидрометеорологических характеристик.

По результатам исследований обоснованы представления о возможных, т. е. реализуемых, характеристиках шести перспективных температурно-влажностных СВЧ радиометрических модулей, обеспечивающих восстановление температурно-влажностных профилей с вертикальным разрешением не хуже 1 км в слое 0,5–5 км от поверхности Земли и с горизонтальным разрешением оптимально 1 км, но не хуже 3 км. Анализ технических характеристик существующих прототипов, результатов расчетов и публикаций позволяет сформировать технические требования к характеристикам перспективных температурно-влажностных СВЧ радиометрических модулей:

- для восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы над поверхностью суши инструментальная предельная точность СВЧ радиометрических модулей в каналах полосы поглощения кислорода (60 ГГц) и водяного пара (22,2 ГГц) должна быть не хуже 0,15–0,20 К, в полосе поглощения кислорода (183 ГГц) – не хуже 0,5 К, в полосах прозрачности 90–150 ГГц – не хуже 0,35 К;

- для восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы над водной поверхностью расчетная предельная точность СВЧ радиометрических модулей в каналах полосы поглощения кислорода (60 ГГц) и водяного пара (22,2 ГГц) должна быть не хуже 0,30 К, в полосе поглощения кислорода (183 ГГц) – не хуже 0,9 К, в полосах прозрачности 90–150 ГГц – не хуже 0,50 К;

- наиболее перспективным представляется сочетание измерений с использованием трех модулей, а именно, модуля для проведения гиперспектральных температурно-влажностных измерений в полосе 165–180 ГГц (склон поглощения полосы водяного пара на 183 ГГц), модуль для устранения мешающего влияния фонового излучения подстилающей поверхности Земли в полосе прозрачности 130–150 ГГц и модуль для восстановления температурных профилей в окрестностях полосы поглощения кислорода 110–120 ГГц (118 ГГц), поскольку при этом возможно проведение измерений с использованием антенной системы с линейной апертурой порядка 1,5–2 м;

- при создании перспективных СВЧ радиометрических систем для исследования атмосферы следует учесть появившуюся в настоящее время возможность их реализации в виде гиперспектральных систем;

- оптимальной на период до 2025 года, по нашему мнению, является также разработка зондировщика, обеспечивающего работу прибора в режиме спектрального сканирования по всем полосам поглощения или их значимым частям;

- при создании температурно-влажностных зондировщиков нового поколения важно отработать новые методы калибровки СВЧ радиометрической аппаратуры, в частности, возможности использования для этих целей GPS-приемников для калибровки аппаратуры по радиозатменным наблюдениям;

– наличие облаков существенным образом сказывается на возможностях восстановления температурно-влажностных профилей практически во всем исследованном (от 15 до 200 ГГц) СВЧ диапазоне, но в большинстве типовых случаев не отменяет эти возможности полностью, а лишь снижает значения весовых температурно-влажностных функций радиояркостей.

Обоснованы представления о возможных характеристиках двух перспективных СВЧ радиометрических модулей для исследования земной поверхности, в том числе показано то, что в составе общего СВЧ радиометрического комплекса для измерений параметров подстилающей поверхности целесообразно выделить два СВЧ радиометрических модуля:

- СВЧ поляриметрический радиометрический модуль сантиметрового/миллиметрового диапазонов (*C, X, Ku, K, Ka, W*) с возможным включением каналов более высоких частот;
- СВЧ поляриметрический радиометрический модуль дециметрового L-диапазона с возможным включением каналов C-диапазона.

Для СВЧ радиометрической системы сантиметрового диапазона предпочтительным режимом сканирования является коническое сканирование, обеспечивающее равномерные по всему скану поляриметрические измерения. Оптимальным является следующий набор каналов СВЧ радиометрической системы сантиметрового диапазона для исследований параметров суши: 10,6350; 18,7000; 19,3500; 23,8000; 36,5000; 89,0; 165 ГГц.

СВЧ радиометрическая система дециметрового диапазона базируется на измерениях в L-диапазоне 1,40–1,42 ГГц. Для СВЧ радиометрической системы дециметрового диапазона наряду с коническим сканированием, вследствие проблем, возникающих при использовании сканирующих антенн с размерами более 2,5 м, допускаются и другие способы организации сканирования, в том числе апертурный синтез и использование панорамных систем.

Пространственное разрешение в миллиметровых каналах должно быть не хуже 1 км (размер апертуры антенной системы 2,5 м), в сантиметровых каналах – не хуже 10 км (размер апертуры антенной системы 2,5 м), в дециметровых – не хуже 30–40 км (размер апертуры антенной системы 4–5 м). Инструментальная точность СВЧ радиометрической системы сантиметрового/миллиметрового диапазонов должна быть не хуже 0,3–0,5 К, дециметрового диапазона – не хуже 0,5 К.

Для обеспечения поляриметрических измерений СВЧ радиометрические комплексы по исследованию подстилающей поверхности должны обеспечивать проведение измерений всех компонент матрицы рассеяния либо эквивалентный ей набор измерений поляризованных компонент излучения.

Кроме проблем комплексирования целевой аппаратуры перспективных космических аппаратов и создания необходимой целевой аппаратуры высокого разрешения СВЧ диапазона спектра существуют еще проблемы качественной обработки микроволновой космической информации.

Общепринятым подходом эффективного использования данных наблюдений Земли различными спутниковыми датчиками становится использование методов *Data Fusion* для всестороннего изучения объектов исследования. Эффективность подхода слияния данных (*Data Fusion*) находит отражение в реализации большого числа программ комплексных спутниковых исследований Земли. В рамках единого формального математического описания показаны и кратко проанализированы три основных подхода к комплексированию данных СВЧ радиометрических спутниковых измерений с независимой информацией других типов:

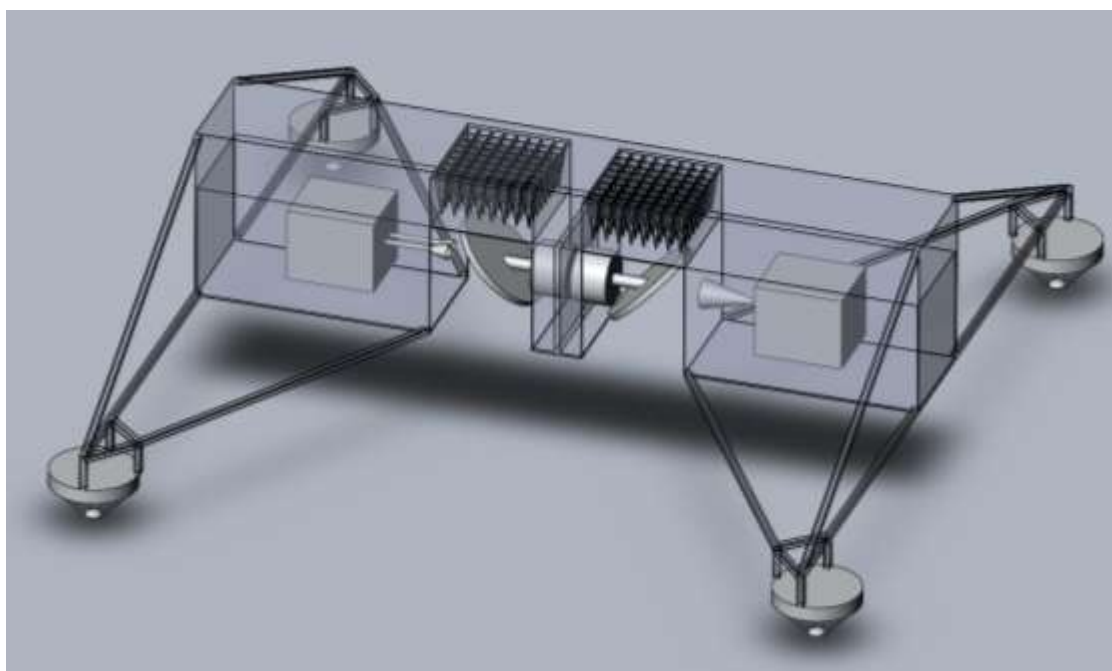
- информацией качественного характера – для коррекции аппаратурных искажений;
- априорной информацией о масштабах пространственной неоднородности изучаемых геофизических параметров – для регуляризации решения обратной задачи;
- информацией спутниковых сканеров-зондировщиков в видимом/ИК диапазоне – для расширения количества определяемых параметров и точности их определения.



Анализ методических проблем пространственно-временного совмещения разнородных спутниковых данных показывает, что масштабами критических интервалов расходимости измерений по времени являются единицы – десятки минут при наблюдении океана, единицы – десятки часов при исследовании атмосферы, единицы суток и более при наблюдении суши.

По результатам исследований выделены основные геофизические параметры, характеризующие атмосферу Земли, Мировой океан и поверхность суши, которые потенциально обеспечивают улучшение точности и надежности восстановления характеристик стандартных продуктов, генерируемых при решении практических задач дистанционного зондирования Земли.

Космическая система в перспективе имеет высокую технико-экономическую эффективность, поскольку ориентирована на использование уникального СВЧ радиометрического комплекса (рис. 1), востребованного в рамках прикладных и научно-исследовательских работ дистанционного зондирования Земли из космоса.



*Рис. 1. Общий вид СВЧ радиометрического комплекса (вид сбоку)*

Такой комплекс обеспечит проведение спутникового всепогодного круглосуточного глобального мониторинга Земли с высоким пространственным разрешением, позволяющим наблюдать изменчивость полей гидрометеорологических параметров с пространственным разрешением порядка 1 км. Результаты работы целесообразно внедрить в Роскосмосе, Росатоме, Росгидромете, МЧС, Минприроды, Минсельхозе, Институтах РАН (ФАНО).

Д.В. Клочков\*;  
 М.А. Коняев\*;  
 А.С. Михайленко\*\*

\* БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

\*\* ООО «НПП "Лазерные системы"», г. Санкт-Петербург.

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Представлены результаты измерений высоты нижней границы облачности с помощью разработанного оптоэлектронного датчика, работающего на длине волны 1,5 мкм. Дано описание принципа работы, оптической схемы датчика, а также алгоритма определения нижней границы облачности. Представлены основные характеристики прибора.

Ключевые слова: нижняя граница облачности, облакомер, лидар, атмосферный приземный слой.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасности гражданской авиации в условиях постоянного развития необходимо измерение и прогнозирование погодных условий, в том числе облачности вблизи аэропортов. Наличие сильной облачности, особенно на низких высотах, может оказать опасное влияние на взлет и посадку самолета. В связи с этим предъявляются высокие требования к точности и оперативности получения и представления информации о высоте облаков. Поэтому разработка оптоэлектронного датчика измерения высоты нижней границы облачности (ВНГО) и параметров атмосферы в приземном слое является актуальной и востребованной задачей. Это один из наиболее важных метеорологических элементов, определяющих условия видимости при взлете и посадке воздушных судов.

Основная цель статьи заключается в демонстрации потенциала разработанного изделия под шифром «Тропос-1.5» и оценке его конкурентоспособности на фоне зарубежных аналогов.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ

На момент 2015 года в государственном реестре сертифицированного оборудования аэродромов и воздушных трасс зарегистрировано три отечественных прибора для измерения нижней границы облачности и два зарубежных.

К большому сожалению, отечественные приборы для измерения нижней границы облачности уступают зарубежным по предельным дистанциям измерения, показателям надежности и точности, удобству технического обслуживания оборудования. В связи с этим значительная доля объема на российском рынке облакомеров представлена зарубежным оборудованием, характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики приборов зарубежных производителей

Производитель	Наименование	Рабочие характеристики		
		Диапазон измерений, м	Длина волны излучения, нм	Точность измерения, м
Vaisala	CL31	0÷7600	910	±5
Jenoptik	CHM15K "NIMBUS"	5÷15000	1064	±5
Campbell Scientific	CS135	0÷10000	910	±4,6
Allweatherinc	Model 8339	0÷7600	910	±6
Degrean Horizon	ALC30	15÷7500	1530	±6

## ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ «ТРОПОС-1.5»

Принцип действия разработанного датчика (рис. 1) основан на светолокационном методе определения ВНГО. Высота ( $h$ ) облаков определяется по формуле

$$h = \frac{ct}{2}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света;

$t$  – время, за которое свет проходит путь от излучателя до облака и обратно.

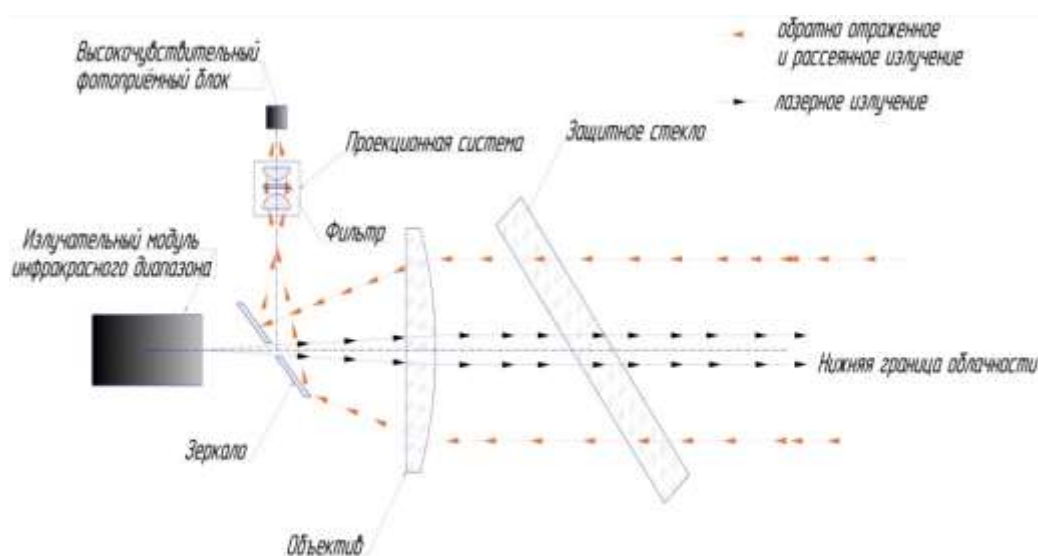


Рис. 1. Оптическая схема датчика

При светолокационном зондировании атмосферы принимаемый сигнал обратно рассеянного излучения определяется уравнением, которое при учете только однократного рассеяния имеет вид (2)

$$P(h) = P_0 A \beta_{\pi}(h) g(h) h^{-2} \exp \left[ -2 \int_0^h \alpha(h) dh \right], \quad (2)$$

- где  $P(h)$  – мощность сигнала, принимаемого с высоты  $h$ ;  
 $P_0$  – мощность источника излучения;  
 $A$  – постоянная, определяемая параметрами прибора;  
 $\beta_{\pi}(h)$  – коэффициент обратного рассеяния;  
 $g(h)$  – геометрический фактор прибора, зависящий от конструктивных параметров его оптической системы;  
 $\alpha(h)$  – коэффициент ослабления.

Облако, являясь аэрозольным образованием с большей плотностью крупных частиц, имеет больший коэффициент обратного рассеяния и ослабления, чем чистая, естественная атмосфера. В зависимости от типа облака его граница может быть очень резкой или плавной и достигать нескольких десятков метров. Поэтому определить наличие облака и его границы возможно, анализируя коэффициенты обратного рассеяния и ослабления лазерного излучения.

В табл. 2 приведены диапазоны значений коэффициентов обратного рассеяния и ослабления для атмосферы при различных метеоусловиях.

Таблица 2

## Коэффициенты обратного рассеяния лазерные датчики

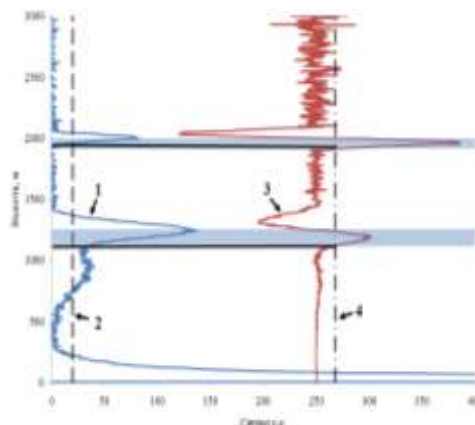
Состояние атмосферы (видимость)		Балл по коду	Метеорологическая дальность видимости $V_M$ , км	Коэффициент ослабления, $10^{-3} \text{ км}^{-1}$
Туман	очень сильный	0	Менее 0,05	Более 21,221
	сильный	1	0,05–0,2	21,221–5,305
	заметный	2	0,2–0,5	5,305–2,122
	слабый	3	0,5–1	2,122–1,061
Дымка	очень сильная	4	1–2	1,061–0,531
	сильная	5	2–4	0,531–0,265
	заметная	6	4–10	0,265–0,11
	слабая	7	10–20	0,11–0,04
Хорошая видимость		8	20–50	0,04–0,009
Отличная видимость		9	50 и более	Менее 0,009

Для решения лидарного уравнения относительно  $\beta$  (коэффициента обратного рассеяния) или  $\alpha$  (коэффициента экстинкции) необходимо провести первоначальную обработку данных лидарного зондирования, которая состоит из следующих основных этапов:

- вычитания фона;
- нормировки на  $R^2$ ;
- сглаживания полученных данных медианным фильтром.

В разработанном изделии используются одновременно два алгоритма для фильтрации неоднородностей, что позволяет повысить эффективность детектирования облачности и ее границ.

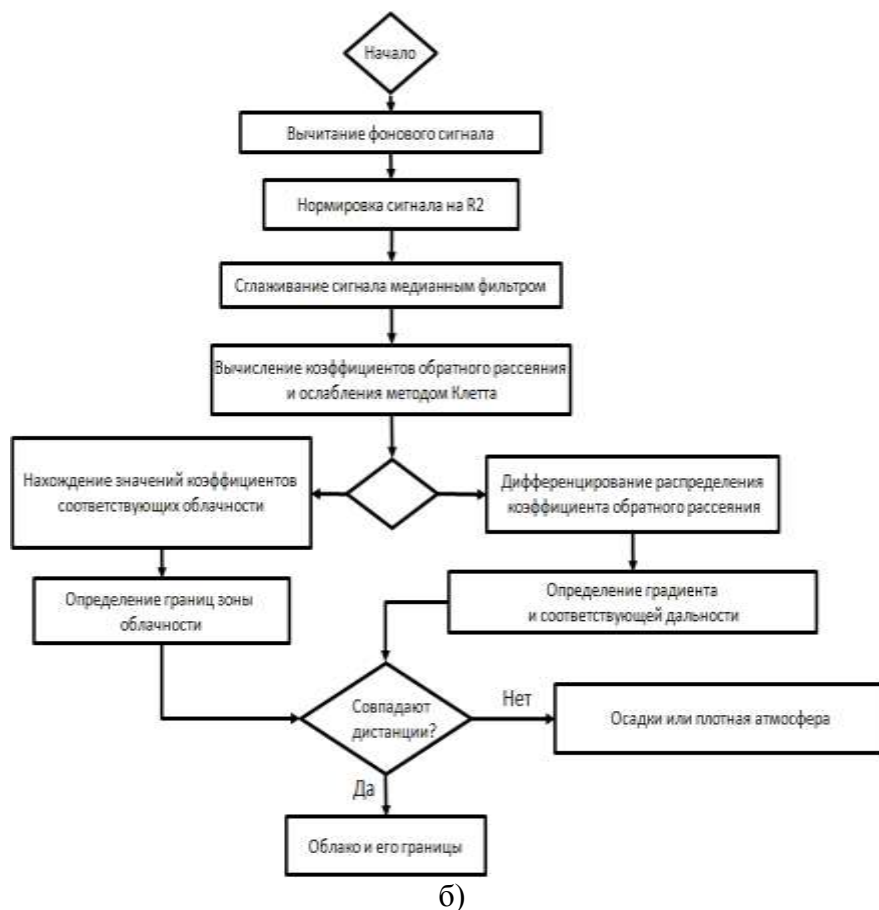
Первый алгоритм позволяет вычислить метеорологическую дальность видимости (МДВ) по направлению луча. МДВ в облаке имеет условные значения от 50 до 150 м. Поскольку осадки или туман также обладают низкими значениями МДВ, то для достоверного детектирования облака необходимо провести дополнительный анализ распределения  $\beta$ . Этот анализ заключается в дифференцировании распределения и определения экстремумов распределения и скорости нарастания коэффициента обратного рассеяния. Графически это представлено ниже (рис. 2,а).



а)

Рис. 2. Обработка лидарного сигнала:

- а – графическое представление; 1 – детектируемый сигнал; 2 – порог по уровню коэффициента ослабления; 3 – первая производная от детектируемого сигнала (смещена для удобства визуализации); 4 – порог по величине градиента;  
б – схема обработки сигнала оптоэлектронного датчика НГО (начало)



б) *Рис. 2. Обработка лидарного сигнала:*

*а – графическое представление; 1 – детектируемый сигнал, 2 – порог по уровню коэффициента ослабления, 3 – первая производная от детектируемого сигнала (смещена для удобства визуализации), 4 – порог по величине градиента;  
б – схема обработки сигнала оптоэлектронного датчика НГО (окончание)*

Полный цикл обработки сигнала аэрозольного лидара можно представить схематично в виде циклограммы, отображенной на рис. 2,б.

Стоит отметить, что не существует четкого определения облака и его характеристик, поэтому количественные критерии коэффициента обратного рассеяния, МДВ и скорости нарастания  $\beta$  являются варьируемыми и могут быть скорректированы в зависимости от экспериментальных данных и особенности местности.

Внешний облик изделия и его технические характеристики представлены на рис. 3.



Длина волны, нм.....	1535
Класс безопасности.....	Class 1
Диапазон измерений ВНГО, м.....	0÷7500
Период выдачи измерений, с.....	2...120
Точность измерения, м.....	±5
Интерфейсы.....	Ethernet, RS-232, RS-485, Модем
Электропитание.....	187 ÷ 247В, 50Гц
Условия эксплуатации.....	-50°С÷+50°С
Габаритные размеры, мм.....	Ø530x860
Масса, кг.....	30

*Рис. 3. Внешний вид разработанного датчика и его технические характеристики*

«Тропос-1.5» выделяет до трех слоев облачности и определяет их нижнюю границу на расстоянии до 7,5 км. За счет большой полосы пропускания аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и короткой длительности импульса датчик обеспечивает пространственное разрешение 10 м, что позволяет получать информацию о тонкой структуре облаков.

В качестве излучателя используется компактный микрочиповый лазер на длине волны 1535 нм, генерирующий импульсы длительностью 3 нс с энергией 7 мкДж. Для облегчения конструкции и минимизации габаритов, приемо-передающая система построена по оптической схеме с одним объективом, в фокусе которого находятся излучатель и активная площадка приемника. В качестве объектива используется асферическая линза со световым диаметром 100 мм. Для подавления части спектра солнечного излучения в изделии используется узкополосный фильтр, установленный в параллельный ход лучей приемного канала между компонентами проекционной системы.

Герметичность корпуса и система термостабилизации внутри изделия позволяют эксплуатировать датчик в условиях повышенной влажности (до 100%) при температуре от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ . Прибор оборудован большим количеством типов интерфейсов для информационного взаимодействия и способен передавать данные на расстояния до 8 км.

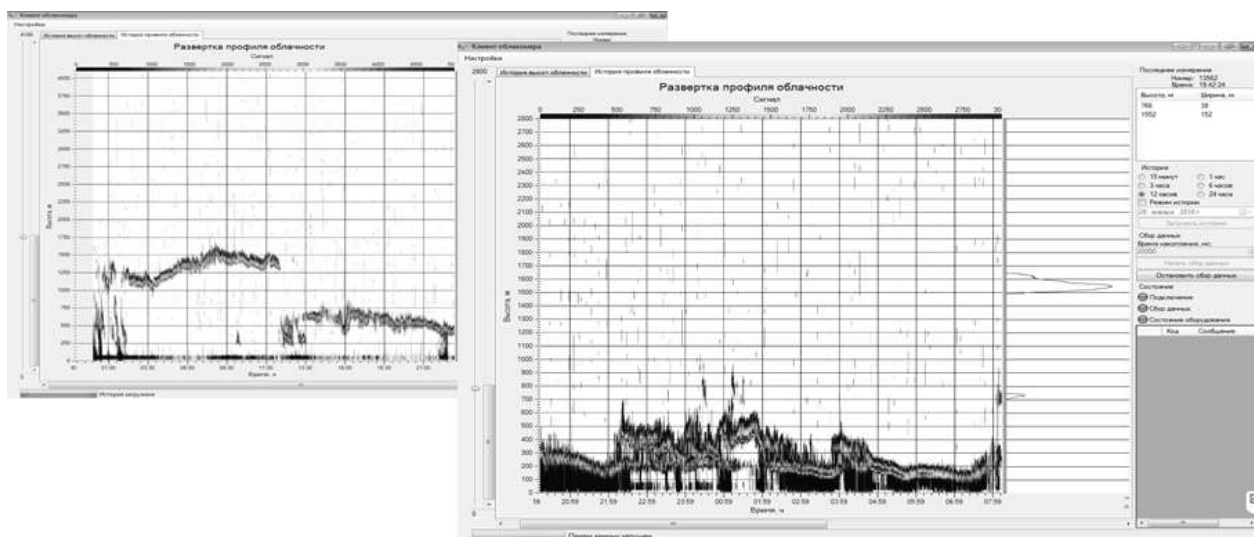


Рис. 4. Пользовательский интерфейс программного обеспечения датчика

Программное обеспечение отображает и хранит данные о нижней границе облаков, профиле обратного рассеяния (рис. 4), а также выводит полную информацию о состоянии внутренних подсистем прибора.

Разработанное изделие полностью соответствует всем требованиям по измерению высоты нижней границы облачности во всей амплитуде изменчивости погодных условий и способно конкурировать с зарубежными аналогами на отечественном и мировом рынке.

#### Список используемых источников

1. Ковалев В.А., Рыбаков Е.Е., Щукин Г.Г. Некоторые характеристики лидарных сигналов при низкой облачности // Труды ордена Трудового Красного Знамени Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 1977. – Т. 395.
2. Оценка возможностей светолокационного импульсного измерителя дальности с накоплением / В.Г. Вильнер и др. // Фотоника. – 2007. – №6. – С. 22–26.

В.М. Краснов,  
доктор физико-математических наук;  
Ю.В. Кулешов,  
доктор техн. наук, профессор

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ЗВУКОВЫМ АНЕМОМЕТРОМ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ВИХРЕВОЙ ДОРОЖКИ ИЗ-ЗА ОБДУВА ДАТЧИКОВ

Предлагается в звуковом анемометре использовать датчики цилиндрической формы, которые при их обтекании воздушным потоком создают поле скорости, описываемое вихревой дорожкой Кармана. Это позволяет выделить диапазон скоростей входного потока, для которого систематическая ошибка измерений анемометра, обусловленная турбулентностью, постоянна. В результате максимальная ошибка измерений в рассматриваемом эксперименте уменьшилась с 16% до ~1,8%.

Ключевые слова: звуковой анемометр, вихревая дорожка Кармана, числа Рейнольдса, систематические ошибки.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] указывается, что звуковые анемометры имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными (например, чашечным) при измерениях в ветровых потоках с пространственным масштабом неоднородностей больше 1 м и частотой опроса меньше 10 Гц. Однако при исследованиях высокочастотных турбулентностей с меньшими пространственными масштабами должны быть использованы традиционные средства измерения. В [2] предпринята попытка оценить погрешность измерений анемометра с датчиками цилиндрической формы для турбулентного потока, описываемого вихревой дорожкой Кармана, и ввести корректирующие коэффициенты. Скорость входного потока изменялась в диапазоне  $u_\infty = 5 \div 15$  м/с. Расчеты на основе модели вихревой дорожки Кармана показали, что для широкого диапазона скоростей  $u_\infty$  входного потока остается постоянной величина  $H_B = (u_m/u_\infty - 1) = -0,23$ , где  $u_m$  – значение скорости потока, осредненное по пути звуковой волны между датчиками и количеству измерений  $n$  во времени. Экспериментальная проверка подтвердила постоянство этой величины, однако ее значение оказалось равным  $H_B \approx -0,16$ . При этом в [2] делается вывод о хорошем совпадении теоретических расчетов и эксперимента, хотя различие величин составляет ~30%. Авторы объясняют это различие несовпадением конфигурации датчиков измерительного прибора и модели. Целью настоящей работы является определение на основе модельных расчетов возможной дополнительной причины ошибки расчетов в работе [2] и оценивание возможности введения корректирующих множителей для компенсации ошибок измерений звукового анемометра.

Возникновение вихрей приводит к изменениям локальной скорости  $u_l$  элементов потока. Зависимость относительной горизонтальной локальной скорости потока  $U_l = \frac{u_l}{u_\infty}$  от координат  $x$  (вдоль направления потока в горизонтальной плоскости),  $z$  (поперек направления потока в вертикальной плоскости) и времени  $t$  описывается следующим выражением [2]:

$$U_l = -\frac{Kw_A}{2} \left\{ \frac{\text{sh}[w_A(Z-B/2)]}{\cos[w_A(X-u_\infty t/l)] - \text{ch}[w_A(Z-B/2)]} - \frac{\text{sh}[w_A(Z+B/2)]}{\cos[w_A(X-(X-u_\infty t/l)-A/2)] - \text{ch}[w_A(Z+B/2)]} \right\}, \quad (1)$$

в котором  $K = \frac{\Gamma}{2\pi l u_\infty}$  (где  $\Gamma$  – циркуляция скорости потока);  $w_A = 2\pi/A$ ;  $A = a/l$ ;  $B = b/l$ ;  $X = x/l$ ;  $Z = z/l$ ;  $a, b$  – расстояние между вихрями вдоль оси  $x$  и  $y$  соответственно;  $l$  – длина

траектории волны от передатчика к приемнику;  $u_s$  – скорость движения вихревой дорожки относительно потока:

$$u_s = \frac{\Gamma}{2a} \operatorname{th} \frac{\pi b}{a}. \quad (2)$$

Экспериментальные исследования [3] показали, что при значении числа Струхала  $St \approx 0,2$  приблизительно постоянными являются следующие безразмерные величины:

$$\lambda = \frac{\Gamma}{u_\infty^2} \left( \frac{u_\infty - u_s}{a} \right) \approx 0.4; \quad \varepsilon = \frac{u_s}{u_\infty} \approx 0.15; \quad \frac{b}{d} \approx 1.2; \quad \frac{b}{a} \approx 0.3; \quad \frac{a}{d} \approx 4; \quad \frac{b}{d} \approx 1.2. \quad (3)$$

Для диапазона значений числа Рейнольдса  $40 < Re < 1000$  известна следующая эмпирическая формула, связывающая числа Струхала и Рейнольдса [3]:

$$St = 0.21(1 - 20/Re).$$

Откуда нетрудно получить, что по крайней мере для части из рассматриваемого в эксперименте диапазона  $400 < Re < 7 \cdot 10^3$  выполняется условие  $St \approx 0,2$ . При этом в [3] отмечается, что соотношения величин (3) в разных экспериментах могут иметь значительный разброс. Возможно по этой причине в [2] при проведении расчетов принято  $\lambda = 0,2$ . Однако необходимо отметить, что если подставить выражение (2) для  $u_s$  в выражение (3) для  $\lambda$ , то получим следующее соотношение:

$$\lambda = \frac{2\varepsilon(1-\varepsilon)}{\operatorname{th}(\pi b/a)}. \quad (4)$$

Откуда видно, что  $\lambda$  не может принимать произвольные, независимые от  $\varepsilon$ ,  $b$ ,  $a$  значения. Гиперболический тангенс является медленно меняющейся функцией в области значений аргумента, равного  $\pi$ . Поэтому основные изменения  $\lambda$  должны быть связаны с изменениями  $\varepsilon$ . В частности, при выборе  $\varepsilon = 0,15$  однозначно должно быть  $\lambda = 0,346$ . Важно также отметить, что соотношение  $b/a$  может быть найдено экспериментально – по фотографии вихревой дорожки. В эксперименте [2] датчики анемометра устанавливались вдоль оси  $x$ . Диаметр акриловых цилиндров, одетых на датчики, равнялся  $d = 0,05$  м (длина цилиндров значительно превышала диаметр); расстояние между краями цилиндров на пути распространения акустического импульса равнялось  $l = 0,15$  м; скорость входного потока изменялась в диапазоне  $u_\infty = 5 \div 15$  м/с. Измерение времени распространения звуковых импульсов между датчиками проводилось с частотой  $f_s = 50$  Гц при осреднении значений по числу измерений  $n = 2100$  на интервале  $\Delta t = 42$  с. Разработанная нами численная модель включает в себя как определение горизонтальной локальной скорости потока  $u_s$  в зависимости от  $x$ ,  $z$  и  $t$  по формулам (1)–(3), так и осредненных ее значений вдоль пути  $l$  акустического импульса и по времени. Расчеты при  $\varepsilon = 0,15$  и  $\lambda = 0,2$  так же, как и в работе [2], показали значение  $H_B = -0,23$ . Однако при выборе в соответствии с формулой (3)  $\lambda = 0,346$  и исходном значении  $\varepsilon = 0,15$  получилось  $H_B = -0,41$ , что еще больше отличается от результата эксперимента. Учитывая, что в экспериментах может наблюдаться разброс величин  $\varepsilon$  и  $\lambda$ , представляется возможным решить обратную задачу: подобрать такое значение  $\varepsilon$  [и далее по формуле (4)  $\lambda$ ], чтобы расчетные значения  $H_B$  были близки к экспериментальным. Результаты модельных расчетов показали, что зависимость  $H_B$  от  $\varepsilon$  носит линейный характер и может быть описана уравнением

$$H_B = k\varepsilon + \operatorname{const}, \quad (5)$$

где  $k$  и  $\operatorname{const}$  являются постоянными коэффициентами.

Подставляя в (5) экспериментальное значение  $H_B = 0,16$ , нетрудно получить  $\varepsilon = 0,55812$ . Вид линейной зависимости  $H_B$  от  $\varepsilon$  сохраняется для всего диапазона скорости входного потока  $u_\infty$ : от 5 до 15 м/с. При этом среднее значение  $\varepsilon$  равняется  $m_\varepsilon = 0,05582$  при среднеквадратическом отклонении  $\sigma_\varepsilon = 4,68 \cdot 10^{-5}$ . Исходя из малой величины  $\sigma_\varepsilon$  по сравнению с  $m_\varepsilon$ , можно считать  $\varepsilon$  не зависящей от  $u_\infty$  и принять равной для данного эксперимента  $\varepsilon = 0,0558$ .



Знание значений величин  $\varepsilon$  и  $\lambda$  для условий данного эксперимента позволяет провести модельные расчеты на основе формулы (1) поля локальной скорости потока  $u_l$ , определить ее средние значения вдоль пути  $l$  распространения акустической волны между датчиками и средние значения скорости  $u_m$  за время измерений. Кроме того, знание поля локальной скорости потока позволяет оценить результаты измерений средней скорости потока  $U_A$ . Для наглядности различий результатов расчета на рис.1 представлены нормированные функции  $u_m/u_\infty$ ,  $U_A/u_\infty$  и относительная скорость входного потока  $u_\infty/u_\infty$  в зависимости от  $u_\infty$ .

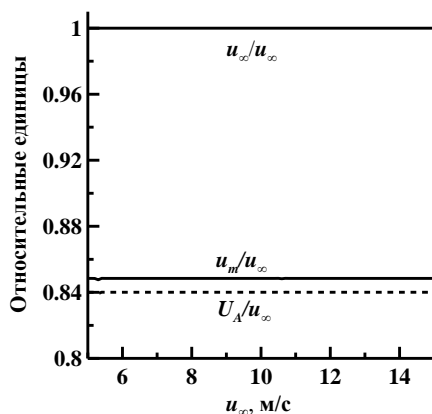


Рис. 1. Расчетные нормированные осредненные по пути  $l$  и времени горизонтальные скорости движения участка потока, определенные на основе картины поля вихревой дорожки —  $u_m/u_\infty$  и при измерении анемометром —  $U_A/u_\infty$

Из рисунка видно, что графики зависимостей  $u_m/u_\infty$  от  $u_\infty$  и  $U_A/u_\infty$  от  $u_\infty$  представляют собой практически прямые линии, параллельные оси абсцисс [небольшие выбросы на кривых обусловлены процессами осреднений по пространству и времени отрезков функций  $u_l(x,t)$  на длине пути  $l$ ]. Такое поведение функций не случайно. Оно является следствием периодичности функции  $U_l(X)$  со строгим сохранением ее формы от периода к периоду. В принципе любая периодическая функция при соответствующем выборе интервалов осреднений по пространству и времени способна обеспечить постоянство величин  $u_m/u_\infty$  и  $U_A/u_\infty$  при изменении  $u_\infty$ . Поэтому для проявления этой закономерности не обязательно, чтобы поле скорости потока описывалось только вихревой дорожкой Кармана. Возможно поэтому в эксперименте [2] наблюдалось приблизительное постоянство величины  $H_B$  при изменении числа Рейнольдса в диапазоне от 400 до 7000, в то время как формулы (3)–(5) считаются справедливыми для диапазона  $40 < Re < 1000$  [3]. Очевидно, что если  $U_l$  не является периодической функцией, а изменяется по пространству или времени, то средние значения  $u_m/u_\infty$  и  $U_A/u_\infty$  также не будут постоянными. Исходя из этого представляется справедливым обратное предположение: если в каком-либо диапазоне числа Рейнольдса величина  $H_B$  остается постоянной, то поле скорости потока описывается периодической функцией вдоль оси  $X$ , и зависимости  $u_m/u_\infty$  и  $U_A/u_\infty$  от  $u_\infty$  представляют собой прямые линии, параллельные оси абсцисс на рис. 1.

Различие по величине  $u_m/u_\infty$  и  $U_A/u_\infty$  на рис. 1 характеризует ошибку измерения анемометром средней скорости движения гидродинамических частиц в турбулентном потоке. В данном случае она составляет величину  $\sim 1\%$  и является систематической. На практике с помощью анемометра необходимо измерять скорость потока, приходящего к датчикам анемометра. Ошибка измерения этой скорости исходя из графика, изображенного на рис. 1, составляет величину 0,16, что соответствует 16%. Очевидно, что величина 0,16 может быть принята за поправочное смещение (систематическую ошибку) при измерении данным анемометром скоростей потока в диапазоне скоростей  $5 \div 15$  м/с. Максимальная ошибка измерений анемометром в этом случае определится максимальным отклонением  $H_B(u_\infty)$  от среднего значения. В опыте эта величина оказалась равной  $\sim 0,018$  [2], что соответствует максимальной ошибке

измерения скорости входного потока  $\sim 1,8\%$ . Дальнейшее уменьшение ошибки измерений анемометра будет возможно только в случае, если удастся создать конструкцию датчиков, обеспечивающую при их обдуве более строгое выполнение условия периодичности поля скорости турбулентного потока. Одним из условий образования вихревой дорожки Кармана при обтекании потоком цилиндра является следующее: длина цилиндра должна быть значительно больше его диаметра. Этим достигаются малые амплитуды возмущения, обусловленные концами цилиндра, по сравнению с фоновой картиной возмущений. В общем случае головки датчиков анемометров имеют произвольную форму, а если они являются цилиндрическими, то их диаметр и длина сопоставимы по величине. В результате условие образования вихревой дорожки Кармана не выполняется.

Для проверки влияния смещения датчиков анемометра по оси  $z$  на точность измерений проведены расчеты зависимости величин:  $u_m/u_\infty$  от  $z$  и  $U_A/u_\infty$  от  $z$ . В результате показано, что если в эксперименте произошло смещение датчиков анемометра по оси  $z$  в пределах  $-0,2 < \frac{z}{l} < 0,2$ , результаты измерений практически остаются неизменными. Поэтому маловероятно, что ошибка установки датчиков анемометра по оси  $z$  могла оказать существенное влияние на результаты эксперимента [2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты на основе модели вихревой дорожки Кармана для условий эксперимента, проведенного в работе [2], показали, что поле скорости имеет строго периодическую структуру вдоль направления потока, по крайней мере в диапазоне значений числа Рейнольдса  $40 < Re < 1000$ . При этом отношение  $u_m/u_\infty$  среднего значения скорости вихревого потока к скорости входного потока, падающего на цилиндр бесконечной длины, является постоянным и не зависит от величины  $u_\infty$ . Значение средней скорости  $U_A$  этого же потока также показало постоянство отношения  $U_A/u_\infty$  и его независимость от  $u_\infty$ , что соответствует результатам эксперимента в работе [2]. Соответственно, разность между  $u_m/u_\infty$  и  $U_A/u_\infty$  также остается постоянной и определяет систематическую ошибку анемометра, задействованного в эксперименте. Ее значение оказалось равным  $\sim 1\%$ , и она может быть скомпенсирована при необходимости измерений  $u_m/u_\infty$ .

В принципе постоянство величины  $U_A/u_\infty$  и ее независимость от  $u_\infty$  могут быть обеспечены вихревой дорожкой произвольного типа при условии, если поле скорости имеет строго периодическую структуру вдоль направления потока. В этом случае отличие величины  $U_A/u_\infty$  от единицы будет определять величину систематической ошибки измерения скорости входного потока  $u_\infty$  с помощью анемометра. На практике для увеличения точности измерений звуковым анемометром при больших скоростях ветра необходимо предусмотреть цилиндрическую конструкцию датчиков с длиной цилиндров, значительно превышающей диаметр. Калибровочные измерения в аэродинамической трубе для конкретного анемометра позволят выделить участки скорости  $u_\infty$ , на которых функция  $U_A/u_\infty$  имеет примерно постоянную величину, определить ее среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Отличие среднего значения от единицы определит систематическую ошибку измерения анемометра, а среднеквадратическое отклонение – случайную составляющую ошибки.

## Список используемых источников

1. Yarin C., Foss A.L., Springer J.F. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Edit by Tropea. – 2007.

2. *Franchini S., Cuerva A., and Sanz-Andrés A.* The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12). – Seoul, Korea, 2012. – P. 2643–2659.
3. *Birkhoff G., Zarantonello E.H.* Jets, wakes and cavities. – New York: Academic Press, 1957. – 353 p.

И.Н. Ростокин\*,  
кандидат техн. наук;  
Е.В. Федосеева\*,  
доктор техн. наук, доцент;  
Г.Г. Щукин,  
доктор физико-математических наук, профессор  
\* МИВлГУ, г. Муром.

## СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ВНЕШНИМ ТЕСТОВЫМ ШУМОВЫМ СИГНАЛОМ

Представлено теоретическое обоснование возможности компенсации влияния различия коэффициентов передачи основных и дополнительных каналов модового разделителя трехдиапазонной сверхвысокочастотной (СВЧ) радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов при введении внешнего тестового шумового сигнала. Рассмотрены условия практической реализации режима с внешним тестовым шумовым сигналом и выполнена оценка оптимальных значений величины ослабления аттенюатора в источнике внешнего шумового сигнала.

Ключевые слова: трехдиапазонная СВЧ радиометрическая система, компенсация фоновых шумов, внешний тестовый шумовой сигнал.

### ВВЕДЕНИЕ

СВЧ радиометрические системы позволяют получать оперативную информацию об изменениях состояния окружающей среды по измеряемому уровню собственного радишумового излучения исследуемой области пространства, что определяет перспективность развития методов и аппаратуры СВЧ радиометрических измерений для дистанционного зондирования физических сред [1, 2]. Важными являются вопросы расширения функциональных возможностей путем перехода к многочастотным измерениям и вопросы снижения зависимости результатов измерений от условий функционирования системы при решении задач повышения точности и стабильности работы систем.

В частности, важным фактором, определяющим точность СВЧ радиометрических измерений, является недетерминированный вклад во входной сигнал радишумового излучения окружающего антенну пространства – фонового шума, величина которого зависит от свойств окружающей среды и параметров антенны [3]. В работах [4–6] проанализированы возможности реализации компенсации влияния фонового шума в многодиапазонных СВЧ радиометрических системах путем последовательного формирования двух сигналов для обеспечения двухканального приема с выполнением соответствующей частотной фильтрации в каждом частотном диапазоне.

В данной статье анализируются условия введения внешнего тестового шумового сигнала, поступающего на вход антенного устройства трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов и оцениваются потенциальные возможности использования внешнего источника шумового сигнала для оперативного контроля параметров системы.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВВЕДЕНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕСТОВОГО ШУМОВОГО СИГНАЛА В СВЧ СИСТЕМУ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ШУМОВ

В СВЧ радиометрической системе с компенсацией фоновых шумов предусматривается реализация двухканального приема, основанного на работе антенного устройства в двухмодовом режиме круглого волновода  $H_{11}$  и  $E_{01}$  с разделением сигналов в специальном устрой-

стве – модовом разделителе [7, 8]. В многодиапазонном режиме двухканального приема возникает задача исключения влияния коэффициентов передачи двухмодового антенного устройства на результаты измерений.

В качестве возможного варианта ее решения предлагается введение внешнего тестового сигнала от источника с калиброванным уровнем шума, который поступает на вход антенного устройства и принимается одновременно с измеряемым сигналом, при этом на выходе каждого блока антенного устройства многодиапазонной СВЧ радиометрической системы формируются следующие выходные сигналы:

– выходной сигнал основного измерительного канала:

$$U_{\text{осн. гш}} \sim k_{\text{осн}}(T_{\text{гл}}(1-\beta)\eta + T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1-\eta)) + k_{\text{осн}} T_{\text{вх. гш}}, \quad (1)$$

– выходной сигнал дополнительного канала:

$$U_{\text{доп. гш}} \sim k_{\text{доп}}(T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1-\eta)) + k_{\text{доп}} T_{\text{вх. гш}}, \quad (2)$$

где  $\beta, \eta$  – коэффициент рассеяния и КПД антенны;  
 $T_{\text{гл}}, T_{\text{бок}}$  – радиояркая температура в области главного лепестка и в области рассеяния ДН антенны;  
 $T_0$  – термодинамическая температура;  
 $T_{\text{вх. гш}}$  – температура генератора шума;  
 $k_{\text{осн}}, k_{\text{доп}}$  – коэффициенты передачи основного и дополнительного каналов антенны.

Для компенсации влияния коэффициентов передачи  $k_{\text{осн}}$  и  $k_{\text{доп}}$  внешний шумовой сигнал вводится периодически путем выключения источника шумового сигнала с последующим формированием разностных выходных сигналов:

$$U_{\text{осн. р}} = U_{\text{осн. гш}} - U_{\text{осн}} \sim k_{\text{осн}} T_{\text{вх. гш}}; \quad (3)$$

$$U_{\text{доп. р}} = U_{\text{доп. гш}} - U_{\text{доп}} \sim k_{\text{доп}} T_{\text{вх. гш}}, \quad (4)$$

которые прямо пропорциональны соответствующим коэффициентам передачи антенных каналов  $k_{\text{осн}}$  и  $k_{\text{доп}}$ . Поэтому влияние последних может быть устранено выполнением процедуры деления сигналов.

## ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ВВЕДЕНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕСТОВОГО ШУМОВОГО СИГНАЛА В СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

Задача введения внешнего тестового шумового сигнала решалась для трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых помех при приеме радиошумового излучения на общую апертуру зеркальной антенны с частотным разделением в облучателе, работающем в двухмодовом режиме (две моды круглого волновода  $H_{11}$  и  $E_{01}$ ), с модовым разделителем для каждого частотного диапазона. Последовательный алгоритм частотного выделения входных сигналов позволил в системе применить единый облучатель зеркальной антенны на три частотных канала [9] с малым рупором источника тестового шумового сигнала, расположенным в отверстии в основании зеркала (рис. 1).

В качестве эталонного источника шумового сигнала был использован модуль СВЧ генератора шума на ЛПД М31305-4 БШ2.210.121ТУ (ГШ). Для управления шумовой температурой генератора шума на его выходе был установлен поглощающий аттенуатор Д2-20, позволяющий плавно регулировать уровень ослабления от -1 дБ до -35 дБ с погрешностью установки ослабления 1,5 дБ (до 19 дБ) и 10 % (до 35 дБ), допустимой максимальной мощностью 0,5 Вт, КСВН 1,08 с выходом в СВЧ – тракт сечением 17×8 мм.

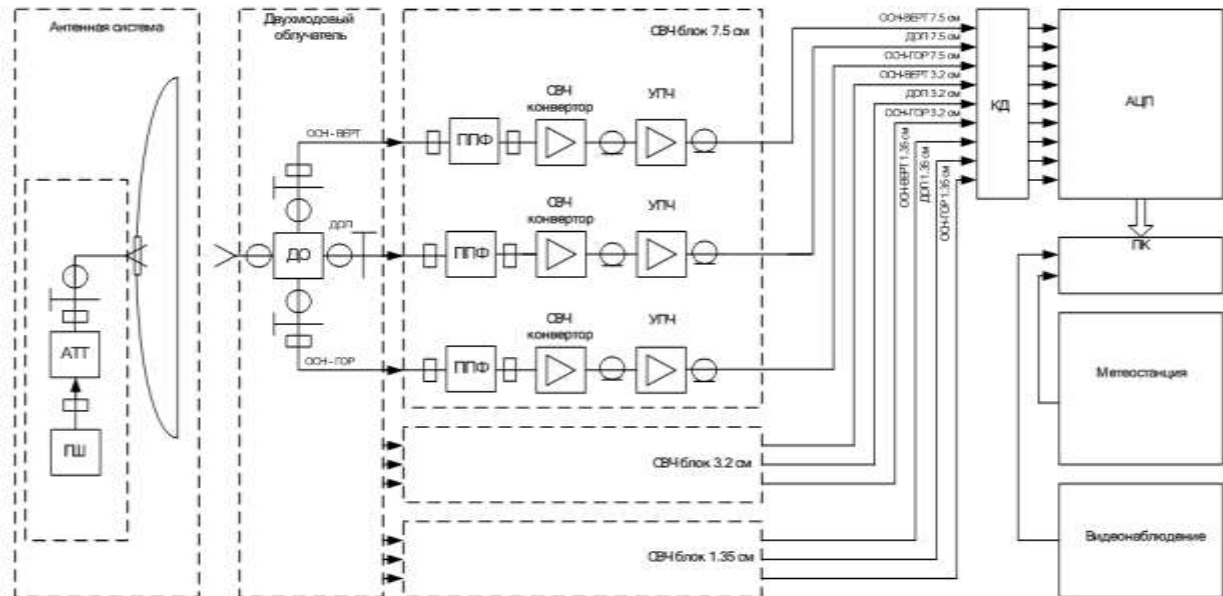


Рис. 1. Структурная схема СВЧ радиометрической системы:  
ГШ – генератор шума; АТТ – аттенюатор; ДО – двухмодовый облучатель;  
КД – многоканальный квадратичный детектор

Всем значениям поглощения аттенюатора от 0 до 1 соответствуют определенные значения интенсивности шума в пределах от  $1 kT_0$  до  $33 kT_0$ , где  $k$  – постоянная Больцмана, поэтому возможна градуировка аттенюатора в единицах интенсивности шума.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМА ВНЕШНЕГО ТЕСТОВОГО ШУМОВОГО СИГНАЛА В СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ШУМОВ

Для экспериментальной оценки потенциальных возможностей реализации режима с внешним тестовым шумовым сигналом в задачах исключения влияния коэффициентов передачи антенных каналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов на результаты измерения были выполнены измерения ради шумового излучения атмосферы при введении тестового шумового сигнала разного уровня. При этом измерялись выходные сигналы при изменении коэффициента ослабления аттенюатора от 0 до -45 дБ (рис. 2), а по данным измерений была выполнена оценка относительных изменений составляющих выходных сигналов основного и дополнительного каналов системы, обусловленных приемом внешнего шумового сигнала (рис. 3).

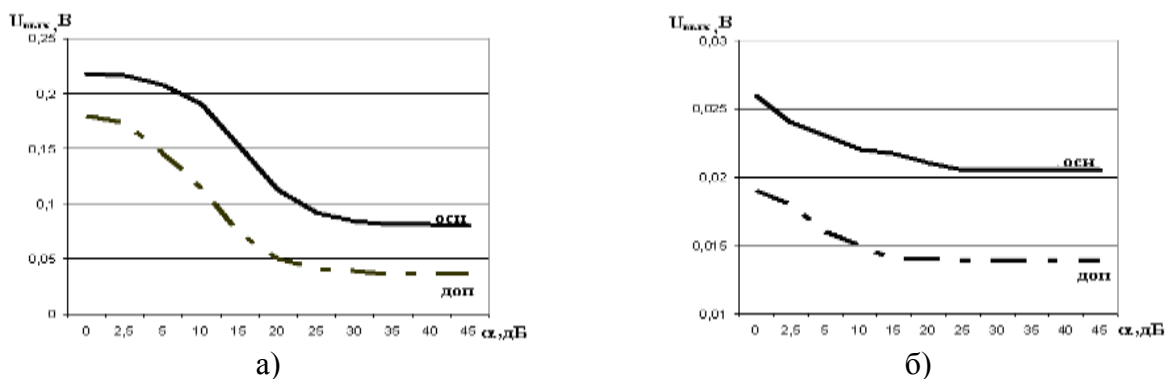


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала СВЧ радиометрической системы от ослабления аттенюатора на частотах 10 ГГц (а) и 4 ГГц (б)

Результаты измерений показали нелинейность зависимости составляющей выходных сигналов от уровня внешнего шумового сигнала, обусловленную ограничениями по уровню входного сигнала и чувствительностью системы. Так, согласно полученным данным для трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы допустимый уровень внешнего шумового сигнала должен быть в пределах, задаваемых ослаблением аттенюатора в диапазоне от -15 до -30 дБ.

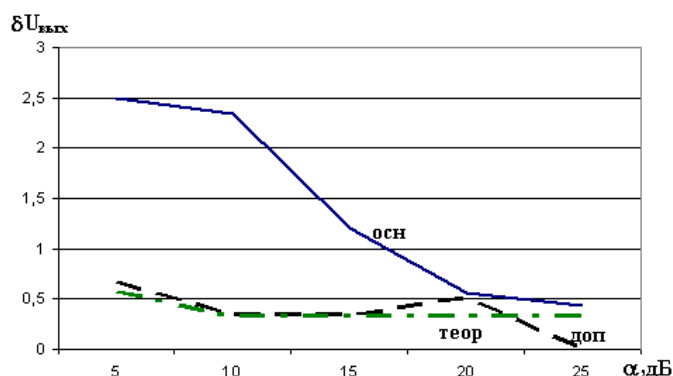


Рис. 3. Относительные изменения составляющих выходных сигналов, обусловленные приемом тестового шумового сигнала внешнего генератора шума

Также были выполнены угломестные измерения радиошумового излучения безоблачной атмосферы в диапазоне углов от 10 до 70° 31.01.2016 при следующих метеоусловиях: температура в месте установки системы — +1,6°C, давление — 749,5 мм рт. ст., влажность — 77%, направление ветра — южное, скорость — 5,4 м/с, при введенном внешнем сигнале с ослаблением аттенюатора -15 дБ (рис. 4).

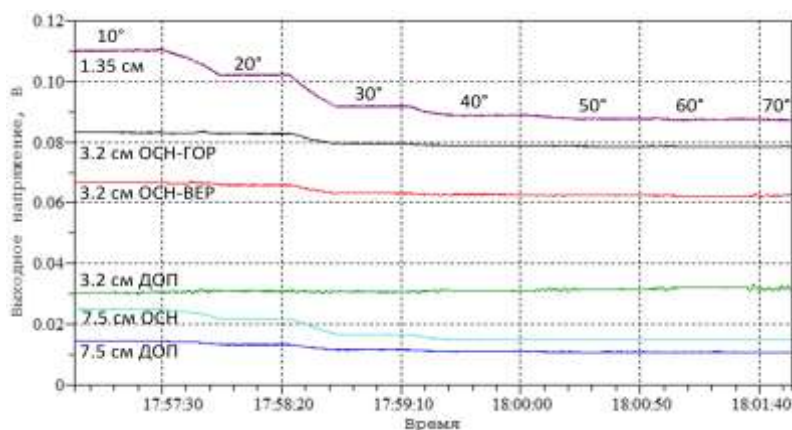


Рис. 4. Результаты угломестных измерений радиошумового излучения атмосферы при внешнем шумовом сигнале с ослаблением аттенюатора -15 дБ

Полученные результаты измерений (рис. 4) доказывают возможность отслеживания изменения уровня радиошумового излучения атмосферы при введении внешнего тестового шумового сигнала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали перспективность введения режима с внешним шумовым сигналом в многдиапазонную СВЧ радиометрическую систему дистанционного зондирования атмосферы с компенсацией влияния фоновых шумов при выполнении антенной

системы на общем зеркале с разделением сигналов основных и дополнительных каналов в многодиапазонном модовом разделителе.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ гранта № 14-02-97510 р\_центр\_a.*

### 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: монография. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 319 с.
3. *Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.* Вопросы метрологического обеспечения радиотеплокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех: монография. – Муром: ИПЦ Муромского института ВлГУ, 2012. – 103 с.
4. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростоккина // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – №1(13). – С. 50–62.
5. *Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.* Исследование влияния осадков на точность СВЧ радиометрических измерений // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2010. – № 562. – С. 225–241.
6. Оценка возможности компенсации помеховых компонент сигнала адаптивной РМС / Е.В. Федосеева, Е.А. Шашкова, Р.Л. Ермаков, И.Н. Ростокин // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2001. – №1. – С. 9–11.
7. *Федосеева Е.В., Ростоккина Е.А., Ростокин И.Н.* Оценка параметров модового разделителя двухканальной зеркальной антенны радиотеплокационной системы // Радиотехника. – 2006. – № 6. – С. 126–128.
8. *Ростокин И.Н., Федосеева Е.В.* Исследование антенного устройства трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы с компенсацией влияния фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – №3(19). – С. 94–100.
9. *Ростокин И.Н., Федосеева Е.В.* Вопросы построения многочастотной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – №1(17). – С. 5–12.



Abramochkin V.N., Krasnenko N.P. Possibilities of investigation and forecast of mesoscale meteorological fields in the atmospheric boundary layer // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 7–10.

Possibilities of the created hardware-software complex intended for monitoring of meteorological conditions in the limited territory are considered. The complex includes various meteorological devices for measuring the parameters of the atmospheric surface and boundary layers whose basis are acoustic radars and software implementing two forecast models. Approaches to the development of a network of measuring systems and methods of forecasting the meteorological conditions are analyzed.

*Key words: meteorology, atmospheric boundary layer, monitoring, forecasting, measuring network.*

High altitude models of earth's magnetic field to the solutions of geophysical and navigation tasks / V.F. Alekseev, I.S. Guryev, Y.A. Kopitenko, P.V. Labetskiy, A.A. Petrova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 11–15.

The role of high-altitude models of the magnetic field of the Earth to solve geophysical tasks and navigating maintenance of aircraft are discussed. The results of the analysis of the deep structure of the Earth's crust are considered in accordance with irregularities in the structure of magnetic anomalies on these high-altitude measurements. Examples of the use of high-altitude maps of the magnetic field to search for minerals in geothermal areas in Central Europe and North America, in the area of deposits of ferruginous quartzite of the Baltic Shield and deposits of hydrocarbons in the oil and gas basins of Tatarstan, Siberia, the Barents Sea, the Mediterranean and the North Sea are given.

*Key words: high-altitude model of the magnetic field of the Earth, magnetic anomalies, magnetic navigation, searching of mineral deposits.*

Numerical simulation of the low-frequency electromagnetic signals propagation in the waveguide Earth-ionosphere / O.I. Akhmetov, M.N. Melnik, I.V. Mingalev, O.V. Mingalev, Z.V. Suvorova, Y.V. Fedorenko, // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 16–20.

A new numerical model of the low-frequency electromagnetic signals propagation in the Earth-ionosphere waveguide is presented. Above the earth's surface, Maxwell's equations are numerically solved together with the linearized system of hydrodynamics equations for each of the charged components of ionospheric gas. Below the surface of the earth (lithosphere), the Maxwell equations are solved together with the Ohm's law and the constitutive equations in which the scalar conductivity and permeability of the medium are given functions of the coordinates. On the Earth's surface the boundary conditions at the interface between two media are used. The results of test runs are considered.

*Key words: numerical simulation, Maxwell equations, the low-frequency electromagnetic signals, waveguide Earth-ionosphere.*

Bekker S.Z., Kozlov S.I., Lyakhov A.N. About few methods of elaboration of D-layer of the ionosphere statistical models // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 21–24.

There are discussed new methods of statistical ionospheric models elaboration. The ranges of heliogeophysical conditions are narrowed to get a better agreement with experiment. The sensitivity analysis of the solutions of the ionization-recombination cycle equations to the input parameters is performed, the results reveal the most significant parameters. It is shown that radio physical results are in qualitative agreement with experimental data of GPO Mikhnevo. Few methods to improve two ways of statistical modeling are described.

*Key words: ionosphere, statistical modeling, probability theory, sensitivity analysis, VLF-LF radio wave propagation.*

Bisyarin M.A. Nonlinear propagation of the acoustical signal in the inhomogeneous waveguide channel // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 25–28.

A nonlinear process of the acoustical pulse propagation in a cylindrical waveguide channel has been regarded. The set of hydrodynamic equations has been reduced to a nonlinear wave equation with a quadratic dependence of the sound speed on the wave amplitude, and the nonlinearity coefficient has been expressed via the medium characteristics. The pulse mode structure and the nonlinear envelope dynamics have been analytically described, with longitudinal inhomogeneity of the waveguide channel being taken into account.

*Key words: atmospheric acoustical waveguide, Euler equations set, nonlinear wave equation, pulse envelope, adiabatic exponent, quadratic nonlinearity, nonlinear Schrödinger equation, bright soliton, dark soliton, graded-index waveguide*

Bubukin V.I., Bubukin I.T. Features of the microbubble layer in the two-layer model of the sea surface as an indicator of the magnitude of the heat flux on the boundary of the sea-atmosphere // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 29–32.

As a result of experimental and theoretical studies of the sea surface in the infrared (IR) range it was shown that the available experimental data are consistent with a model of a thin (compared to IR skin-layer) microbubble layer with the value of the ratio of air in the microbubble layer of  $0.5 \div 0.6$  and with a layer thickness of  $1 \div 3$  microns. It is shown that the thickness of the layer of microbubbles within the framework of this model is an indicator of the magnitude of the heat flux on the boundary of the sea-atmosphere.

*Key words: remote sensing, water surface, infrared, dissolution, heat exchange, a microbubble layer, heat flows.*

Bikov A.V., Shihov A.N. Estimation of mesoscale convective systems forecast reliability in the Perm region by WRF model and remote sensing data // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 33–37.

The article analyses the simulation results of formation and evolution processes of mesoscale convective systems (MCS) with severe weather conditions, over the territory of the Western Urals. We used the mesoscale numerical atmospheric model WRF/ARW for MCS simulation. It is shown that the model reproduce with sufficient reliability the main parameters of mesoscale convective systems. However, the forecast quality of MCS spatial position is unsatisfactory in most cases. It may be determined by the initial conditions obtained by GFS global model.

*Key words: mesoscale convective systems, short-range forecasting, WRF model, remote sensing data.*

Gotur I.A., Rud M.Y. Mathematical model of automated system of processing weather satellites information // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 38–42.

The paper presents mathematical model of automated system of processing weather satellites information. In developed model the basic requirements are related to system output characteristics. Accordingly, the proposed model makes it possible to build a system of processing weather satellites information, forming the required quality thematic products.

*Key words: Weather satellites information (weather satellites), automated processing, mathematical model.*

Gibbs Distribution Using for Modeling of Atmosphere Systems with Variable Particles Count / I.V. Dvoretzkaya, V.M. Zakharov, G.M. Kruchenitskiy, R.G. Romanov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 43–46.

Extension of Gibbs distribution applicability sphere was demonstrated for ozone number density in middle atmosphere and electron concentration in ionosphere. Close agreement with experimental data was obtained on base of assumption of chemical potential's self-shading.

*Key words: Gibbs distribution, system with variable particles count, vertical ozone distribution, chemical potential, electrons in ionosphere distribution.*

Provision of the modern hydrodynamical technology of the forecasting to the Armed Forces of the Russian Federation / A.N. Efremenko, N.O. Moiseeva, A.N. Podkovyrin, V.V. Chernyi // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 47–51.

This article describes possibility of application modern mesoscale hydrodynamic forecasting technologies with use data assimilation procedure to the Armed Forces of the Russian Federation. In this article authors Produce bases of the urgency of bundled- technical software creation of the hydrometeorological security of the Forces of the Russian Federation

*Key words: hydrometeorological security, specialized hydrometeorological information, hydrodynamic forecast model of the atmosphere, data assimilation, bundled- technical software.*

Bakhmetieva N.V., Vyahirev V.D., Kalinina E.E. The study of natural phenomena in the Earth lower ionosphere by the method of an artificial effect on it // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 52–55.

The paper presents the results of the diagnosis of natural phenomena in the Earth lower ionosphere by the method based on the effects on the ionosphere by powerful ground facility with the creation of artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma. Measurements of the characteristics of probe radio waves back scattered from irregularities, provide the information on the most important parameters of the neutral and plasma components of the atmosphere. The results of the studies of ionospheric effects of the Solar eclipse and features Sunset-Sunrise phenomena in the lower ionosphere, and aeronomy of the D-region are presented.

*Key words: lower ionosphere, plasma, neutral atmosphere, heating facility, artificial periodic irregularities, probe radio wave, backscatter, Solar eclipse, Sunset-Sunrise phenomena.*

Blagoveshenskaya N.F. Modification of the high latitude ionosphere by powerful HF radio waves from the EISCAT/Heating facility // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 56–62.

We present the experimental results concerning the modification of the high latitude  $F$  region of the ionosphere by the extraordinary (X-mode) powerful HF radio waves depending on the ratio of the pump wave frequency  $f_H$  to the critical frequency of the  $F2$  layer ( $f_H/foF2$ ). The results obtained demonstrate the evidence of the generation of the strong artificial disturbances, including the excitation of small-scale artificial field aligned irregularities, artificial optical emissions, narrow band stimulated electromagnetic emission, electron density ducts along magnetic field line in a wide altitude range, HF-induced plasma and HF-enhanced ion lines from EISCAT UHF radar spectra. The possible mechanisms of the X-mode HF-induced phenomena are discussed.

*Key words: powerful HF radio wave, high latitude ionosphere, artificial irregularities, narrow band simulated electromagnetic emission, duct of enhanced electron density, incoherent scatter radar, artificial ionospheric turbulence.*

Boldirev M.S., Zhelavskiy S.A., Nikolskiy V.A. The estimation effect of radio waves specular scattering for monitoring the work of HAARP from the territory of Russian Federation //

Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 63–66.

The paper presents estimation possibilities of using DF-distance measuring method for monitoring the work of HAARP. The requirements for the locations of ground-based systems monitoring and requirements for the system radiated power are defined.

*Key words: radio wave, specular scattering, the radio monitoring.*

Bichkov A.A., Petrunin A.M., Castuhin A.V. Mobile system for cloud seeding experiments to artificial increase of precipitation // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 67–70.

In the article provides a description of the developed in the Autonomous Nonprofit Organization «Agency of Atmospheric Technologies» (Moscow) hardware and software, allowing to expand the scope of domestic technologies weather modification of clouds with the purpose of artificial increase of precipitation and to reduce the cost of such works using the modern mobile technical systems.

*Key words: weather modification of clouds, artificial increase of precipitation, mobile compact weather radar «KONTUR-METEO-01", the mobile control center.*

Grigoryev V.F., Sidorenko A.E., Tereshchenko E.D. Effect of the solar eclipse of March 20, 2015 on the propagation of ELF radio waves with frequency of 82 Hz over the high-latitude path // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 71–74.

We have observed the features of the propagation of artificial ELF waves with frequency of 82 Hz in the Earth-ionosphere waveguide during the total solar eclipse. The length of high-latitude path from source located on the Kola Peninsula to receiver on the Svalbard archipelago is about 1200 km. We found a magnetic field amplitude variation. This variation was connected with reaction of the lower Ionosphere to the drastic fall of luminosity. The solar eclipse effect on the artificial ELF waves propagation in the Earth-ionosphere waveguide is observed for the first time.

*Key words: solar eclipse, ELF propagation, lower Ionosphere.*

Kulikov Y.Y., Frolov V.L. Observation a response of mesosphere ozone density on modification of the low ionosphere by the sura facility? // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 75–78.

Results of micro wave observations of the ozone in middle atmosphere during ionosphere modification by powerful HF radio waves are presented. Experiments were conducted at the SURA facility from 2008 to 2015. It is revealed that during ionosphere modification when the effective radiated power was of about of 100 MW the decrease of micro wave intensity in the ozone line (at frequency of 110836.04 MHz) of ~ 10% is took place.

*Key words: ozone, mesosphere, ionosphere modification by powerful radio waves.*

Lebedev N.V., Rudenko V.V. The spacecraft protection from flux of energetic electrons of artificial radiation belts by using HF transmitter // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 79–82.

The estimation of possibility to decrease flux level of energetic electrons in artificial radiation belts by using VLF radiation, initiated by heating of the ionosphere region with a high-frequency transmitter, for spacecraft protection was made.

*Key words: radiation belt, HF heating, magnetosphere, plasmasphere, electron flux, pitch-angle.*

Frolov V.L. Results of measurements of features of artificial electromagnetic and plasma perturbations registered at outer ionosphere altitudes by means of the demeter satellite //

Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 83–86.

The review of experimental results of measurements of features of artificial electromagnetic and plasma perturbations registered at outer ionosphere altitudes by means of the DEMETER satellite onboard instruments is presented. These artificial perturbations were induced in the ionosphere by high-power HF radio waves radiated by the SURA heating facility.

*Key words: modification of the ionosphere by high-power HF radio waves, artificial ionospheric turbulence, plasma perturbations, satellite measurements.*

Variations of the electric field of the atmosphere during thunderstorms / A.H. Adzhiev, M.Y. Bekkiev, S.T. Kazakova, D.D. Kuliev // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 87–91.

The comparative analysis of the data of the computer appliance EFM550 for measuring atmosphere's electric field strength and lightning discharges data received by the network LS8000 during the stormy days and the days without storms was carried out.

*Key words: lightning direction finding network, lightning direction finder LS8000, atmosphere's electric field strength measuring device, EFM550, electric field, meteorological phenomena, lightning discharges.*

Methods of spectral research backgrounds and targets for information support of machine vision systems / A.A. Alekseev, A.V. Jadvovsky, S.V. Kudryavcev, L.I. Chapursky, B.V. Shilin, // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 92–95.

In the article are presented the methods of using spectrophotometric measuring systems in order to get basic data for actualization of databases, used in the process of information support of the remote measurement systems at various life cycle stages in the context of resource constraints.

*Key words: Measurement, spectral brightness factor, spectrophotometer, imaging spectrometer, interaction, database, provision.*

Patterns of forming the outgoing solar radiation in fields of broken clouds / A.V. Artushina, T.B. Zhuravleva, I.M. Nasrtdinov, T.V. Russkova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 96–100.

This paper presents the numerical simulation results of reflected solar radiation in broken clouds (visible range). The regularities of the formation of brightness fields caused by location of clouds in the realizations with small and medium cloud fraction under different illumination conditions are analyzed. The obtained results are compared with radiation calculations in clear sky atmosphere.

*Key words: solar radiation, Monte-Carlo method, broken clouds, 3D cloud effects.*

Microwave sounding differing Earth climatic zone from satellite Meteor-M №2 / A.B. Baranuk, V.P. Kuleshov, L.M. Mitnik, M.L. Mitnik, G.M. Chernyvskiy, I.V. Cherniy // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 101–106.

The features of external calibration of the Meteor-M N 2 MTVZA-GY microwave scanner/sounder are considered. The simulated brightness temperatures  $T_b(\nu)$  derived over the calm cloudless ocean areas and tropical Amazon forest at radiometer channel frequencies  $\nu$  were used. The stability of radiometer operation in flight was estimated by analysis of  $T_b(\nu)$  time series of the Antarctic plateau and the Greenland. They were compared with the time series measured by GCOM-W1 AMSR2 radiometer. The sounder channels at  $\nu = 52-57$  GHz and around water vapor line 183.3 GHz were calibrated with the use of  $T_b(\nu)$  computed from radiosonde data. From the MTVZA-GY data the global  $T_b(\nu)$  fields were constructed and the cyclonic formations with storm and hurricane-force winds were considered.

*Key words:* MTVZA-GY radiometer, Meteor-M N 2, GCOM-W1 AMSR2, external calibration, radiometer stability, Antarctic plateau, Greenland, Amazon forest, time series, cyclones.

To a question of radar supervision of radioactive atmospheric educations / V.A. Bukata, S.B. Varyushchenko, S.V. Kosirev, A.F. Naidanov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 107–110.

Results of theoretical calculations of change of concentration of plasma electrons in a radioactive cloud at impact on it of an electromagnetic signal of the radar are presented, the ratio of a calculated plasma frequency of a radioactive cloud with frequencies of radars of various lengths of waves is given. The received results demonstrate essential increase in an electron concentration of ionization educations in atmosphere sublayers as a result of destruction of the negatively ionized atoms, the preference of use of radars of meter range of lengths of waves of the industrial production for overseeing is proved by technological emissions of the enterprises of a nuclear cycle.

*Key words:* electromagnetic signal, area of the increased ionization (AII), radioactive cloud, electron concentration, radar station, ionization education.

Possibility of use visible and near infrared multispectral and hyperspectral sensors for the bottom classification of shallow seas / O.V. Grigorieva, D.V. Zhukov, A.V. Markov, V.F. Mochalov, A.N. Nikolenko // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 111–115.

The article analyzes the possibility of multi- and hyperspectral imageries in the visible and near infrared regions to detect the type of coastal waters. The empirical indices are proposed to classify sea bottom, taking into account the effects of scattering and absorption of light in water. These indices are produced on the basis of analysis of change in reflectance of water surface. With the use of imageries from the aircraft hyperspectrometer Lepton and multispectral data from satellite sensor WorldView-2 we defined type of bottom for studied area of The Black Sea and the Gulf of Finland.

*Key words:* multi- and hyperspectral data, reflectance, classification, spectral index, type of bottom.

Kobernik D.A., Nikolskiy V.A., Rudenko V.V. Detection sub-surface buried objects by using low-frequency electromagnetic waves // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 116–120.

Abstract: The estimation of possibility detection sub-surface buried object of complicated configuration by using radiation from low-frequency electromagnetic transmitter witch situated in ionosphere or in the earth-ionosphere waveguide was made by using calculation modeling.

*Key words:* earth-ionosphere waveguide, diffraction, sub-surface electromagnetic sounding, VLF- radiation.

Identification of underlying surface types for evaluation of territories according to satellite imagery Landsat-8 for example, the catchment area of the River Narva / S.A. Kondratyev, D.M. Ryzhikov, A.S. Timofeev, E.F. Chichkova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 121–125.

The article describes the surface identification methods by Landsat-8 space images. The surface classification is being conducted using the pixel-based, object-oriented classification and spectral transformations approaches for the Narva catchment zone. The areas is being calculated for surface types. The nutrient load of Narva catchment zone is being calculated by means of ILLM model.

*Key words:* remote sensing, space images, classification, identification, catchment zone, nutrient load.

Petrochenko V.M., Shuleikin V.N., Shchukin G.G. Atmospheric-electric search the underground engineering constructions // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 126–132.

The increased flow of hydrogen and methane on tectonic rifts and karst cavity leads to an increase in radon exhalation. Radon exhalation growth leads to an increase the polar air conductivities and to decay of atmospheric electric field. The observed effects can be used for mapping underground engineering construction from the surface of the Earth.

*Key words: hydrogen, methane, radon, polar air conductivities, atmospheric electric field, underground engineering construction.*

Samohvalov I.V. Remote diagnostics of microstructure of cirrus clouds: problems and prospects // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 133–136.

Discusses the results of a study of the microstructure of cirrus clouds by polarization lidar. Estimated impact of meteorological parameters on formation oriented ensembles of particles. It is shown that comprehensive studies of clouds by lidar and multichannel radiometer MODIS, will create a method of detection from space cloud fields consisting of predominantly oriented particles of ice.

*Key words: cirrus clouds, matrix backscatter, vector Stokes, orientation of ice crystals, lidar and radiometer method, polarization lidar.*

Radar-Lidar monitoring of aerosols and meteoparameters in atmosphere / M.A. Andreev, M.Y. Ilin, D.V. Klochkov, M.A. Konyaev // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 137–140.

We presented complex meteorological monitoring system based on X-band radar and eye-safe 1.5  $\mu\text{m}$  coherent lidar placed in common shelter on venchile. Results of large scale windshear detection using Doppler lidar are presented.

*Key words: coherent doppler lidar, radar, windshear.*

Perspective DWSR with wideband signals compression / B.M. Vovshin, I.S. Vylegzhanin, A.N. Korneev, A.A. Pushkov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 141–145.

The problems of modernization of the first Russian DWSR through the introduction of complex wideband ranging signals with a bandwidth of  $\Delta f=10\text{MHz}$  are under consideration. The preliminary experimental results of measuring the wind profile in different weather situations with the "high-resolution" mode for range are shown. It describes the new structure and the electronic components of the complex digital equipment, providing formation and primary processing (compression) wideband signals. The new modes of work and new digital equipment is expected to introduce the first Russian X-band DWSR.

*Key words: Doppler weather radar, wind profile, wideband range signal, primary digital data processing, high resolution, complete signal compression.*

Development of a method of passive-active radar for storm alert / I.S. Vylegzhanin, V.Y. Zhukov, D.M. Karavaev, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 146–150.

The article describes the method of passive-active radar to improve the accuracy of an operational definition of cloud liquid water profiles in convective clouds, estimating rainfall intensity in meteorology for thunderstorm alert, hail protection and other applications. Discusses the basic requirements for the characteristics and the first results of the development of passive-active C-band radar.

*Key words: method of passive-active radar, meteorological radar, microwave radiometer, passive and active radar system, cloud liquid water content, rain.*

Field measurements of wind parameters using the  $K_a$  band radar and interpretation of complex signals / A.G. Gorelik, D.V. Ermilov, V.M. Kalmykov, M.A. Kononov, K.V. Kulikovskii, V.V. Sterlyadkin, A.V. Khomyakov, N.V. Shirshov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 151–154.

The results of field measurements of wind field and its characteristics using the millimeter-wave radar are considered. An evaluation of the meteorological potential on the basis of the level of reflections from the various types of meteorological objects are presented. Reflected signals with complex Doppler spectra are analyzed on the basis of interpretation of their spectral and spatial properties.

*Key words:  $K_a$  band meteorological radar, interpretation of reflected signals, wind profiler, wind field measurements.*

Development directions of domestic atmospheric radiosounding systems for military and civil purposes / A.V. Gusev, V.E. Ivanov, S.I. Kudinov, O.V. Plohih, N.V. Shirshov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 155–158.

In the report the analysis of current state and improvement prospects of domestic radar and radio navigational upper air sounding systems is made. These systems use a contact method of the atmosphere parameter measurement by means of aerological radiosondes (ARS). Development and application features of radio navigational sounding systems using GLONASS/GPS global navigation satellite system (GNSS) signals for ARS position determination are noted.

*Key words: upper-air radio sounding system, radar, aerological radiosonde, GLONASS/GPS, global navigation satellite system.*

Verification of wind shear detection method by estimated the width of spectrum radar signal / D.A. Denisenkov, V.Y. Zhukov, O.A. Sivak, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 159–163.

Describes an experimental technique to confirm the possibility of using a new method of detecting wind shear. Presents the main results obtained.

*Key words: meteorological radar, wind shear, width of spectrum of signal.*

Denisenkov D.A., Korovin E.A. Universal sensor monitoring system of thunderstorm activity. // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 164–168.

The results of the technical achievements of recent years in the area of thunderstorm activity monitoring have been summarized. The options of placement the universal hardware platform of elements of ground-based monitoring systems of storm activity is offered.

*Key words: thunderstorm monitoring, the definition coordinates of lightning strikes, universal hardware platform of sensor thunderstorm activity.*

Drozdov A.E., Zhiltsov N.N. The Current Status and Development Prospects of the Technical Aids of Hydrometeorological Support of the Navy // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 169–174.

The article describes the basic principles of the creation of the monitoring system on the hydrometeorological situation in the ocean in the interests of Navy; the current status of technical aids of hydrometeorological support and near-term prospects of their development are also presented.



*Key words: system of hydrometeorological support, monitoring, information-measuring system, technical aids, complex of autonomous sensing devices, drifting buoys.*

Efremenko D.S., Serouhova O.S. To the question the influence on of measurement resolution on the statistical data of time series of meteorological variables // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 175–179.

The paper examines the effect of discontinuous measurements of surface temperatures, humidity and atmospheric pressure on the values of basic statistical characteristics of time series of these values. In the calculations used data from automatic meteorological station duration of 1–14 days. Discreteness of measurements ranged from 10 sec to 180 min.

*Key words: meteorological variables, time series, statistical characteristics of time series.*

Possibilities Of Utilization Of The Spaceborne P-Band SAR Together With L/S-Band SAR / A.I. Zakharov, A.A. Kalinkevich, B.G. Kutuza, Y.V. Smirnov, V.I. Stasevich, V.E. Turuk // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 180–184.

Possibilities of utilization of two frequencies SAR operating simultaneously in P-band and S or L-band are considered. Advantages of such system are shown. The required characteristics of the PCA are presented. They are caused by improvement of data interpretation and by decrease of ionosphere influence. Tasks of surface and subsurface sensing by the complex SAR under investigation for vegetation, ice and soil covers are given.

*Key words: SAR of P and S –bands, influence of ionosphere, hybrid mirror antenna, investigation for vegetation, ice and soil covers.*

Kalinnikov V.V., Tertyshnikov A.V., Udrish V.V. Integrated water vapor content and ionosphere remote sensing of global navigation satellite systems signals in Nalchik during March-May 2015 // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 185–189.

The results of integral water vapor content in a vertical atmospheric column sensing by radio signals of global navigation satellite systems in Nalchik during March-May 2015 are presented. The accompanying results of ionosphere sensing with calibration on the IRI-2011 model are given.

*Key words: tropospheric delay, water vapor, ionospheric delay, ionosphere, GLONASS, GPS, electron content, technology, model, magnet storm.*

Perspective approach to creation of space system of monitoring of emergency situations / A.V. Karelin, V.P. Savorskiy, R.S. Salihov, M.T. Smirnov, M.V. Tumanov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 190–193.

Work is focused on creation of the unique space system of monitoring of emergency situations providing carrying out the satellite all-weather round-the-clock global monitoring of Earth allowing to observe, variability of fields of hydrometeorological parameters with spatial resolution about 1 km. Use of six perspective temperature and moist microwave radiometric modules providing restoration of temperature and moist profiles with the vertical permission of 1 km (not worse) and with the horizontal resolution of 1 km is a work cornerstone.

*Key words: emergency situation, space system, remote sensing of Earth, monitoring, microwave oven radiometer.*

Klochkov D.V., Konyaev M.A., Mikhailenko A.S. Optoelectronic sensor for planetary boundary layer monitoring and cloud base height measurement // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 194–198.

We presented results of cloud base height measurements using developed optoelectronic sensor at eye-safe 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength. Main principals, optical scheme and algorithm of cloud base height detection are given in some details in paper. Characteristics of the device are presented.

*Key words: cloud base height, ceilometer, lidar, planetary boundary layer.*

Krasnov V.M., Kuleshov Y.V. Improve the accuracy of wind measurements by a sonic anemometers in the presence of a vortex wake generated by transducers // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 199–203.

It is offered to use in the sonic anemometer cylindrical transducers which generate a von Karman vortex street. Modelling calculations and experiment in a wind tunnel allow to select a range of speeds for which the systematic bias of measurements caused by turbulent flow, is constant for the concrete anemometer. The systematic bias accounting has allowed to reduce the maximal mistake from 16 % up to  $\sim 1.8$  % in the wind range 5 m/s -15 m/s and Reynolds's numbers from 400 up to  $7 \cdot 10^3$ .

*Key words: sonic anemometer, Karman vortex street, Reynolds's numbers, systematic bias.*

Rostokin I.N., Fedoseeva E.V., Shchukin G.G. Microwave radiometric system with external test noise signal // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2016. – Release 653. – P. 204–208.

Presents a theoretical substantiation of possibility of compensation of the differences of the coefficients of transmission of the basic and additional channels mode separator three-band microwave radiometric system with compensation of background noise with the introduction of external test noise signal. The conditions of the practical implementation of mode with external test noise signal and the estimated optimal value of the attenuator at the source of the external noise signal.

*Key words: three-band microwave radiometric system, compensation of background noise, external noise test signal.*

**Абрамочкин Владимир Николаевич**, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН (634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1); кандидат технических наук; тел.: 8 (3822) 492-805, e-mail: ya.wna@yandex.ru

**Аджиев Анатолий Хабасович**, профессор, заведующий отделом стихийных явлений ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (866) 240-19-16, e-mail: adessa1@yandex.ru

**Алексеев Александр Александрович**, начальник 441-й лаборатории – старший бортовой оператор Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (965) 291-74-97, e-mail: akubalexeev@gmail.com

**Алексеев Виктор Фёдорович**, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 217-03-39.

**Андреев Михаил Алексеевич**, ведущий инженер кафедры лазерной техники БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова (190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1); тел.: 8 (812) 317-82-49, e-mail: Andreev@lsystems.ru

**Артюшина Анастасия Валерьевна**, младший научный сотрудник Группы атмосферной акустики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (634055, Россия, Томск, площадь Академика Зуева, 1); тел.: 8 (3822) 49-24-02, e-mail: vav@iao.ru

**Ахметов Олег Иршатович**, научный сотрудник Полярного геофизического института РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: 8-911-800-23-66, 8-815-55-79-285, e-mail: akhmetov@pgia.ru

**Баранюк Анастасия Вячеславовна**, старший инженер Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН» (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: 8 (423) 231 28 54, e-mail: mitnik@poi.dvo.ru

**Бахметьева Наталия Владимировна**, заведующая сектором физики и диагностики нижней ионосферы отдела № 8 Научно-исследовательского радиофизического института ННГУ имени Н.И. Лобачевского (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); доктор физико-математических наук; тел.: 8(831) 436-99-50, e-mail: nv\_bakhm@nirfi.sci-nnov.ru

**Беккер Сусанна Зейтуллаевна**, младший научный сотрудник Института динамики геосфер РАН (119334, Россия, Москва, Ленинский пр., 38 кор. 1); тел.: 8 (985) 809-57-90, e-mail: susanna.bekker@gmail.com.

**Беккиев Мухтар Юсубович**, профессор, директор ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2); доктор технических наук; тел.: 8 (866) 240-13-16, e-mail:vgikbr@yandex.ru

**Бисярин Михаил Александрович**, ведущий научный сотрудник кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9); доктор физико-математических наук; тел.: 8(812)428-99-50, e-mail: m.bisyarin@spbu.ru

**Благовещенская Наталья Фёдоровна**, заведующая лабораторией радиофизических исследований отдела геофизики Арктического и антарктического научно-исследовательского института (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 337-31-91, e-mail: nataly@aari.nw.ru

**Болдырев Михаил Сергеевич**, научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России (141307, Россия, Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2б); тел.: 8 (915) 153-70-67, e-mail: boldurevms@mail.ru

**Бубукин Владимир Игоревич**, ведущий инженер Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский радиофизический институт» (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); тел.: 8 (831) 412-30-94, e-mail: zayas744@yandex.ru

**Бубукин Игорь Тимофеевич**, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский радиофизический институт» (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (920) 077-42-66, e-mail: bubn10@mail.ru

**Буката Владимир Анатольевич**, преподаватель 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 235-96-93, e-mail: axtreel@rambler.ru

**Быков Алексей Васильевич**, магистрант кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15); тел.: 8 (342) 239-63-77, e-mail: blexx256@yandex.ru

**Бычков Алексей Александрович**, главный специалист автономной некоммерческой организации «Агентство атмосферных технологий» (123242, Россия, Москва, ул. Дружинниковская, 15, офис 204); тел.: 8 (916) 525-33-92, e-mail: bychkovaleks@gmail.com

**Варющенко Сергей Борисович**, профессор 104-й Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 235-96-93.

**Вовшин Борис Михайлович**, начальник отдела ОКБ АО «НПО "ЛЭМЗ"» (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (495) 400-25-05.

**Вылегжанин Иван Сергеевич**, главный инженер по направлению АО «НПО "ЛЭМЗ"», (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 620-46-19, e-mail: ISV1980@yandex.ru

**Вяхирев Валерий Дмитриевич**, старший научный сотрудник отдела № 8 Научно-исследовательского радиофизического института ННГУ имени Н.И. Лобачевского (603950,

Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); тел.: 8(831) 436-99-50, e-mail: vyakhirev@nirfi.sci-nnov.ru

**Горелик Андрей Габриэлович**, старший научный сотрудник ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (300034, Россия, Тула, ул. Демонстрации, 36); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (916) 470-22-04, e-mail: radiometeo@mail.ru

**Готюр Иван Алексеевич**, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (904) 556-71-23, e-mail: gotur@newmail.ru

**Григорьев Валерий Федосеевич**, помощник директора ФГБУН «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); тел.: 8 (815) 225-39-58, e-mail: valgri@pgi.ru

**Григорьева Ольга Викторовна**, старший научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 978-85-18, e-mail: alenka12003@mail.ru

**Гурьев Игорь Сергеевич**, старший научный сотрудник 211-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 238-21-01.

**Гусев Андрей Викторович**, старший преподаватель кафедры технологии и средств связи Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 32); тел.: 8 (343) 374-52-92, e-mail: a.v.gusev@urfu.ru

**Дворецкая Ирина Витальевна**, заведующая лабораторией Украинского гидрометеорологического института (03028, Украина, Киев, пр. Науки, 37); кандидат географических наук; тел.: +38 (044) 525-86-30, e-mail: anjes@i.ua

**Денисенков Дмитрий Анатольевич**, преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 219-59-16, e-mail: dimasden@yandex.ru

**Дроздов Александр Ефимович**, ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ» (199106, Россия, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 309-26-99.

**Ермилов Дмитрий Владимирович**, ведущий инженер ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (300034, Россия, Тула, ул. Демонстрации, 36); тел.: 8 (920) 753-69-97, e-mail: rts@cdbae.ru

**Ефременко Александр Николаевич**, начальник научно-исследовательского отдела – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-74, e-mail: geofis\_svu@mail.ru

**Ефременко Дмитрий Сергеевич**, аспирант кафедры экспериментальной физики атмосферы ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); тел.: 8 (812) 633-01-74, e-mail: reearth768@gmail.com

**Жадковский Александр Васильевич**, начальник 442-й лаборатории – старший бортовой оператор Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 911-76-96.

**Желавский Сергей Александрович**, заместитель начальника отдела ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России (141307, Россия, Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2б); тел.: 8 (496) 545-50-78 (рабочий), e-mail: jasmin@spnet.ru

**Жильцов Николай Николаевич**, заместитель начальника управления гидрографии, геофизики и гидрометеорологии ОАО «ГНИНГИ» (199106, Россия, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41); тел.: 8 (812) 322-18-38, e-mail: 12345nik1@rambler.ru

**Жуков Владимир Юрьевич**, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 998-12-06, e-mail: vuzhukov2002@list.ru

**Жуков Денис Валерьевич**, научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 292-45-39, e-mail: spb\_pilligrim@rambler.ru

**Журавлёва Татьяна Борисовна**, ведущий научный сотрудник Группы атмосферной акустики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук» (634055, Россия, Томск, площадь Академика Зуева, 1); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 49-24-02, e-mail: ztb@iao.ru

**Захаров Александр Иванович**, заведующий лабораторией ГНС Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (141190, Россия, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (903) 113-91-89, e-mail: AIZakhar@mail.ru

**Захаров Владимир Матвеевич**, главный научный сотрудник Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (141700, Россия, Долгопрудный Московской области, ул. Первомайская, 3); доктор физико-математических наук; тел.: 8(495) 408-61-41, e-mail: omd@cao-rhms.ru

**Иванов Вячеслав Элизбарович**, заведующий кафедрой технологий и средств связи Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 32); доктор технических наук; тел.: 8 (343) 374-52-92, e-mail: v.e.ivanovekt@gmail.com

**Ильин Максим Юрьевич**, инженер-конструктор ООО «НПП "Лазерные системы"» (198515, Россия, Санкт-Петербург, п. Стрельна, ул. Связи, 34, лит. А); тел.: 8 (921) 645-14-06, e-mail: Ilyin\_m@lssystem.ru

**Казакова Сания Тахировна**, младший научный сотрудник лаборатории атмосферного электричества отдела стихийных явлений ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, КБР, Нальчик, пр. Ленина, 2); аспирант; тел.: 8 (866) 240-19-16, e-mail: saniya\_07@mail.ru

**Калинина Елена Евгеньевна**, программист 1-й категории отдела № 8 Научно-исследовательского радиопизического института ННГУ имени Н.И. Лобачевского (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); тел.: 8(831) 436-99-50, e-mail: elena@kalinin.nnov.ru

**Калинкевич Анатолий Анатольевич**, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (125009, Россия, Москва, Моховая, 11, кор.7); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 629-33-65, e-mail: kalinkevich@newmail.ru

**Калинников Владислав Валерьевич**, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Исследование ближнего космоса» Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, Россия, Казань, ул. Кремлевская, 11); кандидат физико-математических наук; e-mail: vlad-kalinnikov@mail.ru

**Калмыков Виктор Михайлович**, начальник отдела ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (300034, Россия, Тула, ул. Демонстрации, 36); кандидат технических наук; тел.: 8 (4872) 55-40-90; e-mail: rts@cdbae.ru

**Караваев Дмитрий Михайлович**, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: dm.karavaev@mail.ru

**Карелин Александр Витальевич**, начальник отдела ФГУП ЦНИИмаш, (141070, Россия, Королев Московской обл., Пионерская, 4); доктор физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (495) 994-52-75, e-mail: avkarelin@tsniimash.ru

**Клочков Денис Владимирович**, ведущий инженер кафедры лазерной техники БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова (190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1); тел.: 8 (812) 317-82-49, e-mail: den\_klo@mail.ru

**Коберник Дмитрий Александрович**, научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России (141307, Россия, Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26); тел.: 8 (496) 545-50-78, e-mail: jasmine@spnet.ru

**Козлов Станислав Иванович**, ведущий научный сотрудник Института динамики геосфер РАН (119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 38, кор. 1); доктор физико-математических наук; тел.: 8(919)760-18-55, e-mail: s\_kozlov@inbox.ru

**Кондратьев Сергей Алексеевич**, заместитель директора по научной работе ФГБУН ИНОЗ РАН (196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 387-02-60, e-mail: kondratyev@limno.org.ru

**Кононов Михаил Александрович**, доцент Московского технологического университета МИРЭА (119454, Россия, Москва, Проспект Вернадского, 78); кандидат технических наук; тел.: 8 (926) 598-18-88, e-mail: m.kononov79@mail.ru

**Коняев Максим Анатольевич**, доцент кафедры лазерной техники БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова (190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 317-82-49, e-mail: konyayev\_m\_a@rambler.ru

**Копытенко Юрий Анатольевич**, директор Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук» (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 5, лит. «Б»); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (812) 323-78-45, e-mail: office@izmiran.spb.ru

**Корнеев Анатолий Николаевич**, начальник сектора ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А); тел.: 8 (916) 382-07-96.

**Коровин Евгений Александрович**, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-52, e-mail: evgen\_korovin@mail.ru

**Косырев Сергей Викторович**, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 235-96-93.

**Красненко Николай Петрович**, главный научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (634055, Россия, Томск, пр. Академический, 10/3); профессор кафедры радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 40); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 492-418, e-mail: krasnenko@imces.ru

**Краснов Валерий Михайлович**, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 597-55-04, e-mail: vmkrasnov@yandex.ru

**Крученицкий Григорий Михайлович**, заведующий отделом Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (141700, Россия, Долгопрудный Московской области, ул. Первомайская, 3); доцент кафедры СУМГФ ФАКИ МФТИ (141701, Россия, Долгопрудный Московской области, Институтский пер., 9); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (495) 408-61-41, e-mail: omd@cao-rhms.ru

**Кудинов Сергей Иванович**, доцент кафедры технологии и средств связи Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 32); кандидат технических наук; тел.: 8 (343) 374-52-92, e-mail: kudinoffs@mail.ru.



**Кудрявцев Сергей Вячеславович**, руководитель группы, заместитель главного конструктора акционерного общества «Лептон» (124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, 6); тел.: 7 (903) 582-12-11, e-mail: ksv@lepton.ru

**Кулешов Владимир Павлович**, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН» (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: 8 (423) 231 28 54; e-mail: mitnik@poi.dvo.ru

**Кулешов Юрий Владимирович**, заместитель начальника Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского по учебной и научной работе (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; профессор; тел.: 8 (812) 235-28-71, e-mail: kuleshov\_y@mail.ru

**Кулиев Далхат Даниялович**, заведующий лабораторией атмосферного электричества отдела стихийных явлений ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2); тел.: 8 (866) 240-19-16, e-mail: kouliev\_dal@hotmail.com

**Куликов Юрий Юрьевич**, ведущий научный сотрудник ИПФ РАН (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (951) 909-43-46, e-mail: yuyukul@appl.sci-nnov.ru

**Куликовский Константин Владимирович**, аспирант кафедры физики Московского технологического университета МИРЭА (119454, Россия, Москва, Проспект Вернадского, 78); тел.: 8 (916) 977-63-27, e-mail: constantinkk@mail.ru

**Кутуза Борис Георгиевич**, заведующий лабораторией ГНС Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (125009, Россия, Москва, Моховая, 11, кор.7); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (916) 615-33-21, 8 (495) 629-33-65, e-mail: kutuza@cplire.ru

**Лабетский Павел Владимирович**, начальник лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 837-69-89, e-mail: p.v.labetskiy@gmail.com

**Лебедев Николай Вячеславович**, научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России (141307, Россия, Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 2б); тел.: 8 (496) 545-50-78, e-mail: jasmin@spnet.ru

**Ляхов Андрей Николаевич**, заместитель директора Института динамики геосфер РАН (119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 38, кор. 1); кандидат технических наук; тел.: 8 (916) 120-93-22, e-mail: alyakhov@idg.chph.ras.ru

**Марков Андрей Викторович**, начальник 3-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 995-10-33, e-mail: markov\_av69@mail.ru

**Мельник Михаил Николаевич**, младший научный сотрудник Полярного геофизического института РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (815) 55-79-591, e-mail: melnik@pgia.ru

**Мингалев Игорь Викторович**, старший научный сотрудник Полярного геофизического института РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (815) 55-79-291, e-mail: mingalev\_i@pgia.ru

**Мингалев Олег Викторович**, заведующий сектором Полярного геофизического института РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (921) 172-02-38, 8-815-55-79-291, e-mail: mingalev\_o@pgia.ru

**Митник Леонид Моисеевич**, заведующий лабораторией спутниковой океанологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН» (690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (423) 231-28-54, e-mail: mitnik@poi.dvo.ru

**Митник Майя Львовна**, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН» (ТОИ ДВО РАН) (690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43); кандидат технических наук; тел.: 8 (423) 231-28-54; e-mail: mitnik@poi.dvo.ru

**Михайленко Александр Сергеевич**, руководитель проектов ООО «НПП "Лазерные системы"» (198515, Россия, Санкт-Петербург, п. Стрельна, ул. Связи, 34, лит. А); тел.: 8 (812) 612-02-88, e-mail: Michaylenko@lsystems.ru

**Моисеева Наталья Олеговна**, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-74, e-mail: natali.ziadinova@yandex.ru

**Мочалов Виктор Фёдорович**, старший научный сотрудник 33-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 916-12-09, e-mail: vicavia@yandex.ru

**Найданов Александр Фотеевич**, доцент 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических, доцент; тел.: 8 (812) 235-96-93.

**Насртдинов Ильмир Мансурович**, старший научный сотрудник лаборатории оптики аэрозоля Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук» (634055, Россия, Томск, площадь Академика Зуева, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 49-24-02, e-mail: wizard@iao.ru

**Николенко Александр Анатольевич**, заведующий лабораторией компьютерных и интернет-технологий Московского физико-технического университета (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9); тел.: 8 (916) 164-02-53, e-mail: alex\_nikolenko@mail.ru

**Никольский Василий Александрович**, начальник отдела ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России (141307, Россия, Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26); кандидат технических наук; тел.: 8 (496) 545-50-78 (рабочий), e-mail: jasmin@spnet.ru

**Петрова Алевтина Александровна**, заведующая сектором магнитной картографии Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук» (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 5, лит. «Б»); кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; 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, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(911) 257-03-40, e-mail: vmpetrochenko@mail.ru

**Петрунин Андрей Михайлович**, главный специалист автономной некоммерческой организации «Агентство атмосферных технологий» (123242, Россия, Москва, ул. Дружинниковская, 15, офис 204); тел.: 8 (916) 115-91-58, e-mail: a.m.petrinin@mail.ru

**Плохих Олег Васильевич**, старший преподаватель кафедры технологии и средств связи Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 32); тел.: 8 (343) 374-52-92, e-mail: o.v.plohih@urfu.ru

**Подковырин Андрей Николаевич**, начальник 321-й научно-исследовательской лаборатории – старший научный сотрудник отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-74, e-mail: andreypodkovyrin@mail.ru

**Пушков Александр Александрович**, инженер-программист ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А); тел.: 8(909) 630-40-60.

**Ростокин Илья Николаевич**, доцент кафедры УКТС Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (920) 944-15-84, e-mail: arostokina@yandex.ru

**Романов Роман Геннадиевич**, магистрант кафедры СУМГФ ФАКИ МФТИ (141701, Россия, Долгопрудный Московской области, Институтский пер., 9); тел.: 8 (495) 408-74-59, e-mail: romanroman13-13@mail.ru

**Руденко Виталий Владимирович**, ведущий научный сотрудник ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России (141307, Россия, Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (496) 545-50-78 (рабочий), e-mail: jasmin@spnet.ru

**Рудь Мария Юрьевна**, научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 970-37-37, e-mail: smeyashka@gmail.com

**Русскова Татьяна Владимировна**, научный сотрудник Группы атмосферной акустики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук» (634055, Россия, Томск, площадь Академика Зуева, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (3822) 49-24-02, e-mail: [btv@iao.ru](mailto:btv@iao.ru)

**Рыжиков Дмитрий Михайлович**, инженер отдела дистанционного зондирования Земли ЦНИИ РТК (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр. 21); тел.: 8 (911) 717-86-95, e-mail: [ryzhikov89@yandex.ru](mailto:ryzhikov89@yandex.ru)

**Саворский Виктор Петрович**, заведующий лабораторией Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (141190, Россия, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 994-52-75.

**Салихов Рашит Салихович**, заместитель генерального директора по космическим системам Научно-исследовательского института электромеханики (143502, Россия, Истра Московской обл., Панфилова, 11); кандидат технических наук; тел.: 8 (495) 994-51-42, e-mail: [elkos@niiem.ru](mailto:elkos@niiem.ru)

**Самохвалов Игнатий Викторович**, заведующий кафедрой оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Томского государственного университета (634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (382) 241-39-84, 8 (903) 914-44-80, e-mail: [lidar@mail.tsu.ru](mailto:lidar@mail.tsu.ru)

**Сероухова Ольга Станиславовна**, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (812) 633-01-74, e-mail: [serouhova@inbox.ru](mailto:serouhova@inbox.ru)

**Сивак Ольга Александровна**, младший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (952) 361-51-05, e-mail: [berjeraksivak@yandex.ru](mailto:berjeraksivak@yandex.ru)

**Сидоренко Антон Евгеньевич**, младший научный сотрудник ФГБУН «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15.); тел.: 8 (815) 225-39-58, e-mail: [anton@pgi.ru](mailto:anton@pgi.ru)

**Смирнов Михаил Тимофеевич**, ведущий научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (141190, Россия, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 994-52-75.

**Смирнов Юрий Викторович**, заместитель начальника отделения ПАО РКК «Энергия» (141070, Россия, Королёв Московской обл., ул. Ленина, 4а); тел.: 8 (903) 109-37-60, e-mail: [urri-s@yandex.ru](mailto:urri-s@yandex.ru)

**Стасевич Владимир Игоревич**, генеральный директор ОАО «НПП "РОБИС"» (Россия, Москва); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (495) 229-81-88, e-mail: [walter@robis.ru](mailto:walter@robis.ru)

**Стерлядкин Виктор Вячеславович**, профессор кафедры физики Московского технологического университета (119454, Россия, Москва, пр. Вернадского, 78); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (916) 631-70-72, e-mail: sterlyadkin@mail.ru

**Суворова Зоя Викторовна**, младший научный сотрудник Полярного геофизического института РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (815) 55-79-498, e-mail: suvorova@pgia.ru

**Терещенко Евгений Дмитриевич**, научный руководитель ФГБУН «Полярный геофизический институт» (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, 15); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (815) 225-39-58, e-mail: evgteres@pgi.ru

**Тертышников Александр Васильевич**, старший научный сотрудник ФГБУ «ИПГ» (129128, Россия, Москва, ул. Ростокинская, 9); доктор технических наук, старший научный сотрудник; e-mail: atert@mail.ru

**Тимофеев Алексей Сергеевич**, младший научный сотрудник отдела дистанционного зондирования Земли ЦНИИ РТК (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21); тел.: 8 (960) 257-42-01, e-mail: lelltim3@yandex.ru

**Туманов Михаил Владимирович**, директор по научной и инновационной деятельности Научно-исследовательского института электромеханики (143502, Россия, Истра Московской обл., ул. Панфилова, 11); тел.: 8 (495) 994-52-75, e-mail: Mikhail.tumanov@niiem.ru

**Турук Владимир Эдуардович**, заместитель генерального конструктора по космической тематике АО «Концерн радиостроения "ВЕГА"» (121170, Россия, Москва, Кутузовский пр., 34); кандидат технических наук; тел.: 8(926) 295-15-82, e-mail: turuk.vladimir @yandex.ru

**Удриш Владимир Викторович**, начальник Гидрометеорологической службы ВС РФ, (119160, Россия, Москва, Фрунзенская набережная, 22/2); тел.: 8 (495) 696-47-53.

**Федосеева Елена Валерьевна**, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (602264, Россия, Муром, ул. Орловская, 23); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (905) 144-42-06, e-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

**Федоренко Юрий Валентинович**, заведующий сектором Полярного геофизического института РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской обл., ул. Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (815) 55-79-355, e-mail: yury.fedorenko@gmail.com

**Фролов Владимир Леонтьевич**, заведующий сектором ФГБНУ НИРФИ (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (910) 872-44-80, e-mail: frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

**Хомяков Александр Викторович**, заместитель директора ОАО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (300034, Россия, Тула, ул. Демонстрации, 36); кандидат технических наук; тел.: 8 (487) 256-00-39, e-mail: rts@cdbae.ru

**Чапурский Леонид Иванович**, старший научный сотрудник 44-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайско-

го (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (911) 015-25-50, e-mail: chlispb@yandex.ru

**Частухин Андрей Викторович**, главный специалист автономной некоммерческой организации «Агентство атмосферных технологий» (123242, Россия, Москва, ул. Дружинниковская, 15, оф. 204); тел.: 8 (916) 257-69-61, e-mail: a.chastuhin@mail.ru

**Чернявский Григорий Маркелович**, научный руководитель Научно-технологического центра «Космонит» ОАО «Российские космические системы» (117997, Россия, Москва, ГСП-7, ул. Профсоюзная, 84/32); доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН; тел.: 8 (495) 334-82-66; e-mail: icherny@cpi.space.ru

**Чёрный Виктор Васильевич**, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории 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, e-mail: natali.ziadinova@yandex.ru

**Чёрный Игорь Владимирович**, заместитель директора Научно-технологического центра «Космонит» ОАО «Российские космические системы» (117997, Россия, Москва, ГСП-7, ул. Профсоюзная, 84/32); доктор технических наук; тел.: 8 (495) 334-82-66; e-mail: icherny@cpi.space.ru

**Чичкова Елена Фёдоровна**, начальник отдела дистанционного зондирования Земли ЦНИИ РТК (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21); кандидат географических наук; тел.: 8 (904) 642-08-95, e-mail: efchichkova@ya.ru

**Ширшов Николай Васильевич**, начальник геофизического отдела ФГУП «ЦЭНКИ» (105318, Россия, Москва, ул. Ткацкая, 7); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (499) 912-86-12, e-mail: gfo@russian.space

**Шилин Борис Владимирович**, главный научный сотрудник Научно-исследовательского центра экологической безопасности Российской академии наук (197110, Россия, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18); доктор геолого-минералогических наук, профессор; тел.: 8 (921) 920-78-78, e-mail: bvhilin@rambler.ru

**Шихов Андрей Николаевич**, доцент кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15); кандидат географических наук; тел.: 8 (342) 239-66-33, e-mail: and3131@inbox.ru

**Шулейкин Владимир Николаевич**, главный научный сотрудник Института проблем нефти и газа (119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 65); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (903) 511-91-36, e-mail: shvn@yandex.ru

**Щукин Георгий Георгиевич**, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (921) 899-55-05, e-mail: ggshchukin@mail.ru

**Борисов Алексей Анатольевич**, заместитель начальника 52-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, e-mail: alebor\_72@mail.ru

**Гончаров Игорь Владимирович**, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(812) 297-75-95, e-mail: igor\_goncharov52@mail.ru

**Готюр Иван Алексеевич**, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52.

**Доронин Александр Павлович**, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: doronin52@mail.ru

**Краснов Валерий Михайлович**, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (812) 597-55-04, e-mail: vmkrasnov@yandex.ru

**Летучий Юрий Александрович**, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8(812) 347-95-52, e-mail: vka.52@mail.ru

**Маков Алексей Борисович**, докторант 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(921) 923-08-03, e-mail: alexmakof@mail.ru

**Петроченко Вячеслав Михайлович**, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(911) 257-03-40, e-mail: vmpetrochenko@mail.ru

**Щукин Георгий Георгиевич**, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (921) 899-55-05, e-mail: ggshchukin@mail.ru