

На правах рукописи



Пашинов Евгений Владимирович

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ
ТРОПОСФЕРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА
ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНЫХ
ДИСТАНЦИОННЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность:
1.3.4 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена
в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)

Научный руководитель: **Шарков Евгений Александрович**
доктор физико-математических наук, профессор,
ИКИ РАН

Официальные оппоненты: **Нерушев Александр Федорович**
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник, главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения
«Научно-производственное объединение Тайфун»

Смирнов Михаил Тимофеевич
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, ведущий научный сотрудник
лаборатории инструментальных и информационных
методов исследования окружающей среды средствами
дистанционного зондирования Фрязинского филиала
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова
Российской академии наук»

Защита диссертации состоится 27 мая 2022 г. в 12:00
на заседании диссертационного совета 24.1.111.02
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
Российской академии наук (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН)
по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
ИРЭ им. В. А. Котельникова: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Pashinov/index.html>.
Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью,
просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя учёного секретаря
диссертационного совета.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.111.02
доктор физико-математических наук



Л. В. Кузьмин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В настоящее время одно из главных мировых научных направлений — наблюдение за изменением климата и изучение климатообразующих процессов. Многолетние исследования в области климатологии показали, что огромную важность в формировании климата имеют процессы переноса тепла и влаги в системе океан—атмосфера. Результаты исследований этих процессов позволяют лучше понять механизмы и спрогнозировать глобальные изменения климата в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Наиболее сильно и динамично процессы переноса тепла и влаги в атмосфере происходят над тропическими районами океана. В этих районах зарождаются и развиваются мощные атмосферные вихри — тропические циклоны. Взаимодействие океана и атмосферы в зоне действия тропических циклонов резко усиливается. Воздушные массы с высокой влажностью приобретают огромную энергию, а при выходе на сушу наносят колоссальный ущерб и приводят к человеческим жертвам. Таким образом, возникает необходимость постоянного мониторинга атмосферы, особенно в тропической зоне, и прогноза интенсивности и траектории тропических циклонов.

Чтобы установить общие закономерности эволюции процессов, влияющих на формирование климата, следует анализировать не результаты измерений тех или иных геофизических параметров в отдельных точках или сильно усреднённые глобальные или полушарные параметры, а их распределение в виде полей. Для этого необходимо иметь данные наблюдений на больших временных и пространственных масштабах с хорошей регулярностью и плотностью покрытия.

Длительное время экспериментальные исследования климата Земли проводились в основном при помощи зондирования контактными способами с поверхности Земли (и соответственно накопление информации происходило весьма длительное время), а также дистанционными спутниковыми методами в инфракрасном (ИК) и оптическом диапазонах. Если первые обеспечивали только точечные измерения с длительным временем накопления (месяцы и годы), то вторые давали информацию о верхней тропосфере, стратосфере и, частично, в мезосфере и, в первую очередь, о содержании парниковых газов. А самая насыщенная и деятельная часть атмосферы — нижняя и средняя тропосфера, где происходит наиболее интенсивный тепло- и влагообмен, в глобальном аспекте практически не затрагивалась.

Благодаря появлению новых космических комплексов, проводящих измерения в микроволновом диапазоне длин волн, ситуация в корне изменилась. Радиотепловой диапазон имеет ряд преимуществ перед остальными при решении задачи дистанционного мониторинга климатических процессов. Прежде всего — это всепогодность и независимость от времени суток. Волны микроволнового диапазона обладают меньшим поглощением, чем волны оптического и инфракрасного диапазона. Высокая проникающая способность радиоволн дала возможность по спутниковым данным радиотеплового зондирования Земли восстанавливать поля интегральных по высоте геофизических характеристик нижней и средней тропосферы не зависимо от наличия облачности. В настоящее время на орбите присутствует порядка 30 радиотепловых комплексов, запущенных мировыми космическими агентствами, что показывает интерес крупнейших стран к проблеме глобального изменения климата и важную роль радиотепловых спутниковых систем в её решении.

Неуклонное развитие микроволновой аппаратуры позволило в конце XX — начале XXI века достичь высокой чувствительности измерений на верхних частотных границах микроволнового диапазона. Такие измерения, совместно с развитием теоретической и вычислительной базы, позволили получать оценки вертикального распределения параметров атмосферы по радиотепловым измерениям из космоса. Эта информация в виде глобальных трёхмерных полей может дать существенно более качественное понимание процессов, происходящих в атмосфере. Восстановление глобальных трёхмерных полей водяного пара по данным спутникового радиотеплового зондирования — довольно сложная задача как с технической, так и с математической точки зрения. На данный момент в мире существуют только четыре спутниковые микроволновые миссии, основная цель которых состоит в восстановлении детальных профилей влажности атмосферы.

Один из перспективных проектов в данном направлении — разрабатываемый в отделе исследования Земли из космоса Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) космический экспе-

римент (КЭ) «Конвергенция», который планируется провести на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС). Полное название проекта: «Определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы при исследовании генезиса атмосферных катастроф». Основным продуктом этого эксперимента станут глобальные трёхмерные поля температуры и влажности тропической и среднеширотных зон планеты. Для обеспечения наилучшей детальности восстанавливаемых глобальных трёхмерных полей водяного пара в ходе эксперимента проводился поиск новых методов и подходов к решению данной задачи.

Существующими микроволновыми миссиями уже накоплены некоторые объёмы данных радиотепловых измерений, по которым при применении соответствующей методики обработки могут быть восстановлены глобальные трёхмерные поля атмосферного водяного пара.

Таким образом, задача исследования новых методов и алгоритмов восстановления глобальных трёхмерных полей водяного пара атмосферы по данным радиотепловых спутниковых измерений, особенно в нижней её части, где происходит большая часть термодинамических процессов, выступает важной и актуальной научной задачей.

Цель диссертационной работы

Исследование и обоснование новых методов повышения точности восстановления вертикальных профилей влажности тропосферы по данным радиотепловых спутниковых измерений и создание алгоритмов восстановления глобальных трёхмерных полей водяного пара в атмосфере Земли.

Для достижения поставленной цели потребовалось проведение целого ряда теоретических исследований и экспериментальных работ.

Конкретные задачи, решённые в диссертации

1. На основе научной литературы и специализированных интернет-ресурсов проведён анализ современных методов измерений, посвящённых задачам восстановления вертикального распределения влажности атмосферы Земли по данным спутниковых радиотепловых измерений.

2. Проведены компьютерные расчёты чувствительности классического набора радиометрических каналов, которые в настоящее время широко используются на практике, к вариациям профиля влажности на различных высотах, показана их низкая чувствительность и невысокая пространственная избирательность в слое 1–5 км.

3. Детально исследован теоретически и обоснован результатами компьютерного моделирования подход с применением дифференциальных радиотепловых измерений в полосе 22,235 ГГц, обеспечивающий улучшение чувствительности и высотной избирательности к изменению профиля влажности в нижней тропосфере в слое 1–5 км. Предложен и обоснован

набор частот, обеспечивающий повышение качества восстановления профиля водяного пара.

4. Проведён натурный эксперимент по восстановлению профиля влажности тропосферы при зондировании с поверхности Земли на основе дифференциальных радиотепловых измерений, который подтвердил эффективность подхода и возможность восстановления сложных профилей с инверсией.

5. Разработан и опробован путём численного моделирования нейросетевой алгоритм, улучшающий точность восстановления вертикального распределения влажности атмосферы на основе данных радиотеплового спутникового зондирования с дополнительным использованием радиометрических каналов в полосе 22,235 ГГц. Алгоритм проверен на практике: восстановлены глобальные трёхмерные поля водяного пара за 1,5 года на основе данных измерений спутникового микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002), конструкторе бортовых космических приборов).

Объект исследования

Трёхмерные поля водяного пара в атмосфере Земли.

Предмет исследования

Вертикальное распределение абсолютной влажности тропосферы.

Научная новизна

На основе компьютерного моделирования прямых и обратных задач впервые обоснована эффективность использования дополнительного набора радиометрических каналов в полосе 22,235 ГГц при восстановлении профиля водяного пара в тропосфере Земли по данным радиометрических измерений из космоса.

Проведён натурный эксперимент по восстановлению профиля влажности тропосферы при зондировании с поверхности Земли на основе подхода с применением дифференциальных радиотепловых измерений, который подтвердил эффективность подхода и возможность восстановления сложных профилей с инверсией.

Отработан и подтверждён результатами компьютерного моделирования нейросетевой алгоритм, обеспечивающий повышение точности восстановления вертикального распределения влажности атмосферы на основе данных радиотеплового спутникового зондирования с дополнительным использованием радиотепловых каналов в полосе 22,235 ГГц. Алгоритм проверен на практике: восстановлены глобальные трёхмерные поля водяного пара за 1,5 года на основе данных измерений МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2).

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты компьютерного моделирования прямой и обратной задач подтвердили улучшение высотной избирательности и повышение чувствительности спутниковых радиометрических измерений к вариациям профиля влажности в тропосфере Земли при использовании дополнительных радиотепловых каналов в полосе 22,235 ГГц.

2. Результаты натурного наземного эксперимента на базе перестраиваемого радиометра P22M (18–27,2 ГГц) доказали, что предложенный и развитый в диссертации подход с использованием оптимизированного набора радиометрических каналов позволяет восстанавливать на высотах от 1,5 до 6,5 км с высотным разрешением 1 км не только стандартные профили влажности, но и профили с инверсией.

3. Обосновано использование дополнительных частот и реализован соответствующий нейросетевой алгоритм, обеспечивающие повышение точности восстановления профиля влажности на высотах от 1,5 до 4,5 км при наблюдении со спутников за счёт использования оптимизированного набора радиометрических каналов в интервале 18–27 ГГц, а именно, каналов: 18,7; 24,0; 24,5; 25,5 и 26,5 ГГц.

4. На основе данных фактических наблюдений МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) построены глобальные трёхмерные поля влажности атмосферы на высотах от 0,6 до 8,6 км за 1,5 года; показано, что дополнительное использование радиометрических каналов 18,7; 23,8 и 31,5 ГГц на вертикальной поляризации (V) уменьшило погрешности восстановления профиля влажности на высотах 1,5–4 км на 12–29 %.

Научная и практическая ценность работы

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с научными планами ИКИ РАН в рамках государственного задания Федерального агентства научных организаций РФ по теме «Мониторинг» «Разработка методов технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Автор принимал также участие в выполнении работ в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 14-02-00839-а, 15-05-08401-а, 18-02-01009-а, подготовке эскизного проекта составной части опытно-конструкторской работы (СЧ ОКР) «Конвергенция».

В работе теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность применения дифференциальных радиотепловых измерений в полосе 22,235 ГГц для восстановления профиля влажности нижней тропосферы и разработаны методики обработки как наземных, так и спутниковых дифференциальных радиотепловых измерений. Было показано преимущество применения дополнительных радиотепловых каналов в полосе

22,235 ГГц совместно с традиционным набором каналов в полосе 183,31 ГГц при восстановлении профиля влажности. Были разработаны методики, которые могут быть применены для потоковой обработки данных наземного перестраиваемого радиометра P22M и результатов спутниковых измерений радиотепловыми комплексами МТВЗА-ГЯ и разрабатываемого прибора МИРС (микроволновой радиометр-спектрометр), входящего в состав научной аппаратуры космического эксперимента «Конвергенция».

Степень достоверности результатов проводимых исследований

Подтверждается применением современных методов математического моделирования задач, анализа информационной ёмкости (степеней свободы) предложенных наборов частотных каналов, хорошим соответствием результатов, полученных в ходе наземного эксперимента и обработки спутниковых данных с результатами моделирования, данными реанализа и радиозондовыми измерениями.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует формуле специальности 1.3.4 — радиоп физика и относится к области исследования, указанной в паспорте специальности под номером 5 в части «Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание систем дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы».

Апробация результатов

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором в период с 2013 по 2020 г. Они докладывались на следующих отечественных и международных конференциях:

- 11-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2013 г.);
- 10-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики (Москва, 2013 г.);
- 12-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014 г.);
- 11-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики (Москва, 2014 г.);

- 13-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2015 г.);
- 12-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики (Москва, 2015 г.);
- 3-я Всероссийская Микроволновая конференция (Москва, 2015 г.);
- 14-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2016 г.);
- 13-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики (Москва, 2016 г.);
- 12-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодёжной школы ФРЭМЭ'2016 (Суздаль, 2016 г.);
- 14-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики (Москва, 2017 г.);
- 15-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2017 г.);
- 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium (Санкт-Петербург, 2017 г.);
- 15-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики (Москва, 2018 г.);
- 16-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2018 г.);
- 13-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодёжной школы ФРЭМЭ'2018 (Суздаль, 2018 г.);
- 16-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики (Москва, 2019 г.);
- 17-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2019);
- Семинары отдела 55 ИКИ РАН «Физические основы микроволнового зондирования» (Москва, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.).

Публикации по теме работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором в период с 2013 по 2019 г. Основные результаты работы опубликованы, также они были представлены на российских и международных конференциях и отражены в 36 публикациях, среди которых 8 входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, из них 8 работ индексируются в РИНЦ, 8 — в Scopus. Общий объём опубликованных работ составляет 15,7 печатных листов, из них 11 печатных листов принадлежат соискателю лично. Индекс Хирша в РИНЦ — 4.

Личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, получены диссертантом самостоятельно или на равных правах с соавторами. Диссертант принимал участие в постановке и проведении натурных экспериментов; в обработке экспериментальных данных; в обработке данных спутниковых измерений. Автору принадлежат: разработка программного комплекса для моделирования собственного радиотеплового излучения системы океан — атмосфера и проведение модельных расчётов с использованием разработанного программного комплекса; оптимизация набора дополнительных частотных каналов в полосе 22,235 ГГц для уточнения профиля влажности в нижней тропосфере при измерениях из космоса; разработка программного комплекса, позволяющего проводить восстановление профиля влажности атмосферы при экспериментальных измерениях с поверхности Земли многоканальным микроволновым радиометром P22M с использованием подхода дифференциальных радиотепловых измерений в полосе 22,235 ГГц; идея применения радиотепловых измерений на частотах 18,7–31,5 ГГц при восстановлении профиля влажности тропосферы на основе данных спутникового радиотеплового комплекса МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2); разработка алгоритмов восстановления профиля влажности тропосферы на основе искусственных нейронных сетей по модельным данным МИРС КЭ «Конвергенция» и реальным данным спутникового радиотеплового комплекса МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2).

Благодарности

Диссертант выражает глубокую признательность Евгению Александровичу Шаркову за научное руководство диссертационной работой. Автор выражает благодарность Стерлядкину Виктору Вячеславовичу за помощь и поддержку в теоретических исследованиях на всех этапах диссертации, а также за первоначальную идею применения дифференциальных радиотепловых каналов для измерений профиля влажности атмосферы. Автор признателен Смирнову Михаилу Тимофеевичу за предоставление многоканального микроволнового радиометра P22M для проведения натурных

экспериментов. Автор выражает особую благодарность Черному Игорю Владимировичу за предоставление архива данных измерений спутникового радиотеплового комплекса МТВЗА-ГЯ. Автор признателен Кузьмину Алексею Владимировичу, Садовскому Илье Николаевичу и Селунскому Александру Борисовичу за обсуждение и оценку результатов диссертационной работы. Автор выражает благодарность Комаровой Наталии Юрьевне за оказание помощи в оформлении диссертации и автореферата, а также всем сотрудникам отдела № 55 «Отдел исследования Земли из космоса» ИКИ РАН за поддержку в течение всего периода работы над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна исследования, выносимые на защиту положения, описана общая структура диссертационной работы.

Глава 1 носит обзорный характер. В ней рассмотрены основные научные задачи, которые требуют информации о глобальном трёхмерном распределении водяного пара в тропосфере Земли. Кратко рассмотрены источники такой информации. Показаны требования Всемирной метеорологической организации (ВМО), предъявляемые к точности восстановления профиля водяного пара в тропосфере. Согласно этим требованиям, необходимо обеспечить соответствующие измерения в глобальном масштабе с погрешностью от 20 до 5 % с вертикальным разрешением от 3 до 0,6 км от поверхности до верхней границы тропосферы и горизонтальным разрешением до 20 км.

Изложена история развития средств и методов микроволнового радиометрического зондирования профиля влажности тропосферы из космоса. Показано, что наиболее современные комплексы радиотеплового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (ATMS (*англ.* Advanced Technology Microwave Sounder), Saphir, МТВЗА-ГЯ) проводят зондирование профиля влажности тропосферы на 3–6 каналах в области сильной линии поглощения водяного пара 183,31 ГГц (150–183 ГГц), при этом весовые функции таких каналов широки (порядка 4–5 км), что ограничивает вертикальное разрешение восстанавливаемых профилей. Для восстановления профиля влажности используются три основных метода решения обратных задач: регрессионные, физические итерационные с использованием статистических данных и методы машинного обучения.

Большая часть предложенных в литературе алгоритмов разработана для восстановления профиля относительной влажности в 4–7 атмосферных слоях от поверхности до 10–12 км. Погрешности восстановления при этом составляют порядка 20 %. Такие результаты находятся на грани требований ВМО для использования в задачах климатологии и прогнозирования.

Также кратко описывается разрабатываемый в ИКИ РАН космический эксперимент «Конвергенция», планируемый к выполнению на российском сегменте Международной космической станции и имеющий полное название «Определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы при исследовании генезиса атмосферных катастроф». Важной частью научной аппаратуры эксперимента станет микроволновый радиометр-спектрометр МИРС, в разработке которого автор диссертационной работы принимал активное участие, чему посвящена значительная часть диссертационной работы.

В главе 2 приведены основные статистические характеристики вертикальных распределений физических параметров тропосферы на основе анализа судовых радиозондовых измерений за 2014–2016 гг. Показано, что над поверхностью океана дисперсия влажности растёт с высотой. Наиболее равномерное распределение без явных максимумов абсолютная влажность имеет в атмосфере тропиков и средних широт летом на высотах от 1,5 до 4,5 км (рис. 1а). Атмосфера этих областей наиболее насыщена водяным паром. В области тропосферы от 0 до 5 км, где находится основная масса влаги, изменения профиля абсолютной влажности происходят коррелировано в пределах дистанции 1–2 км по высоте (рис. 1б).

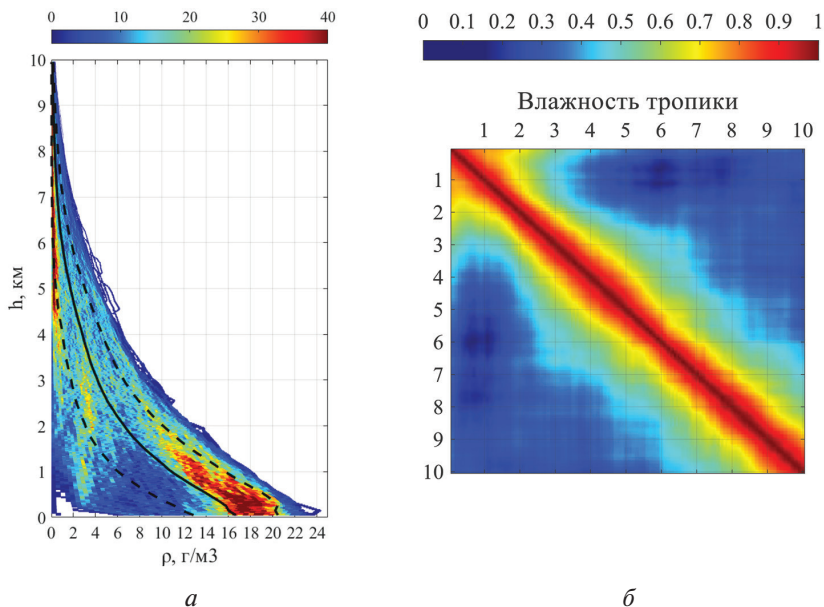


Рис. 1 Двумерные гистограммы профилей влажности тропической тропосферы (а), корреляционная матрица профиля абсолютной влажности тропической тропосферы (б)

Приведены основные соотношения, которые были использованы для моделирования радиотеплового излучения системы океан–атмосфера, принимаемого на спутнике. На основе результатов моделирования исследована чувствительность радиотепловых измерений к изменению профиля влажности тропосферы на типичном наборе частотных каналов, используемом для зондирования профиля влажности. Показано, что из-за сильного поглощения вблизи линии 183,31 ГГц радиотепловые измерения на типичном наборе частот 165,5–183,31 ГГц наиболее чувствительны к изменению профиля влажности на высотах от 4 до 10 км. Ниже 4 км, особенно для тропической и летней среднеширотной атмосферы, весовые функции частотных каналов вблизи линии 183,31 ГГц не позволяют получить хорошего высотного разрешения и чувствительности к изменению профиля влажности (рис. 2).

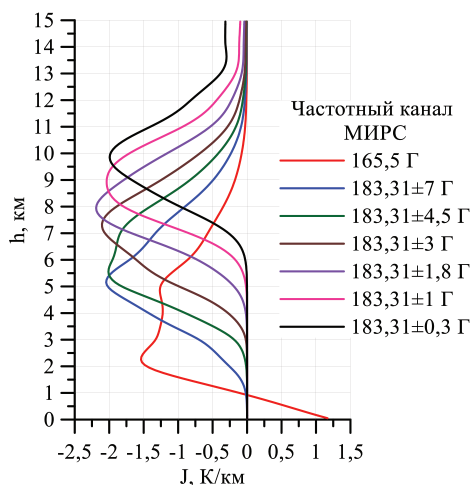


Рис. 2. Весовые функции каналов $(165,5–183,31) \pm 0,3$ ГГц радиометрического комплекса МИРС КЭ «Конвергенция» для стандартной тропической атмосферы

Всё вышперечисленное позволило сделать вывод, что необходим поиск новых методов радиотеплового зондирования из космоса, которые могли бы обеспечить повышение точности восстановления профиля водяного пара в нижних слоях тропосферы до высот 4–5 км.

В главе 3 приводится обоснование применения и выбор дополнительного набора радиотепловых каналов в области полосы поглощения 22,235 ГГц для повышения точности восстановления профиля влажности нижней тропосферы при зондировании из космоса. В настоящий момент измерения в полосе 22,235 ГГц считаются непригодными для зондирования

профиля влажности тропосферы из космоса из-за слабой чувствительности таких измерений к его вариациям.

Для этого используется подход с применением дифференциальных радиотепловых измерений, который заключается в вычитании радиотепловых сигналов на двух близких частотах в полосе поглощения 22,235 ГГц. При этом формируется дифференциальная весовая функция, которая имеет максимум, оторванный от поверхности Земли, чего не наблюдается на одиночных каналах в полосе 22,235 ГГц (рис. 3).

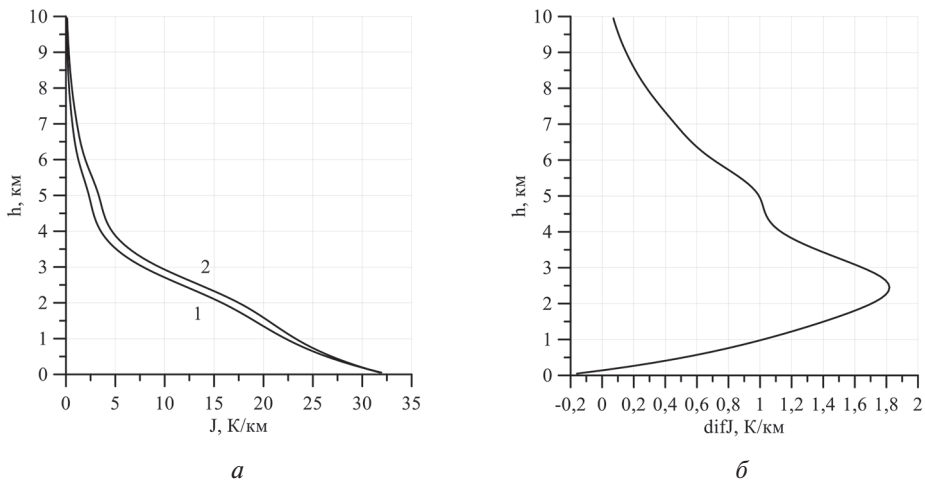


Рис. 3. Весовые функции влажности стандартной тропической атмосферы при зондировании с поверхности Земли под зенитным углом 51° : *а* — для одиночных частот (1 — 24 ГГц, 2 — 23 ГГц); *б* — для разности частот (ν_1 — 23 ГГц, ν_2 — 24 ГГц)

Было проведено моделирование зависимости высоты и амплитуды дифференциальных весовых функций при зондировании с поверхности Земли и из космоса. Результаты моделирования показали, что из-за слабого поглощения в атмосфере на этих частотах дифференциальные весовые функции при зондировании с поверхности Земли и из космоса имеют схожий вид. Дифференциальные весовые функции с оторванным от поверхности максимумом находятся в диапазоне частот от 20 до 27 ГГц и покрывают область нижней тропосферы от 0 до 4,5 км. При этом их форма и амплитуда слабо зависят от полосы приёма радиометра, а зависят только от разности частот вычитаемых каналов. Так, при разности частот 1 ГГц амплитуда дифференциальной весовой функции составляет порядка 2 К, что существенно выше флуктуационной чувствительности радиометра при полосе приёма порядка 500 МГц.

Помимо демонстрации чувствительности измерений в полосе 22,235 ГГц к вариациям профиля влажности дифференциальные измерения могут быть использованы непосредственно как источник информации для восстановления профиля влажности нижней тропосферы. Несмотря на то что случайная ошибка измерений при вычитании сигналов растёт, систематические ошибки при таких измерениях за счёт различных плохо известных факторов могут быть снижены. Так же может быть уменьшено влияние мешающего излучения подстилающей поверхности или облачности, которое слабо меняется на близких частотах. Для проверки возможности дифференциальных измерений при восстановлении профиля влажности был проведён наземный эксперимент с перестраиваемым в диапазоне 18–27,2 ГГц радиометром Р22М (СКБ ИРЭ РАН) на океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН (МГИ) (пос. Качивели, Крым). В ходе эксперимента наилучшие результаты восстановления с корреляцией между истинным и восстановленным профилем порядка 0,9 были получены на высотах от 1,5 до 6,5 км (высотное разрешение 1 км). При этом хорошо восстанавливаются не только близкие к стандартным экспоненциальные профили, но и профили, имеющие инверсии.

На основе проведённого исследования предложен набор дополнительных частотных каналов в полосе 22,235 ГГц, который был оптимизирован для реализации в комплексе МИРС КЭ «Конвергенция» (рис. 4).

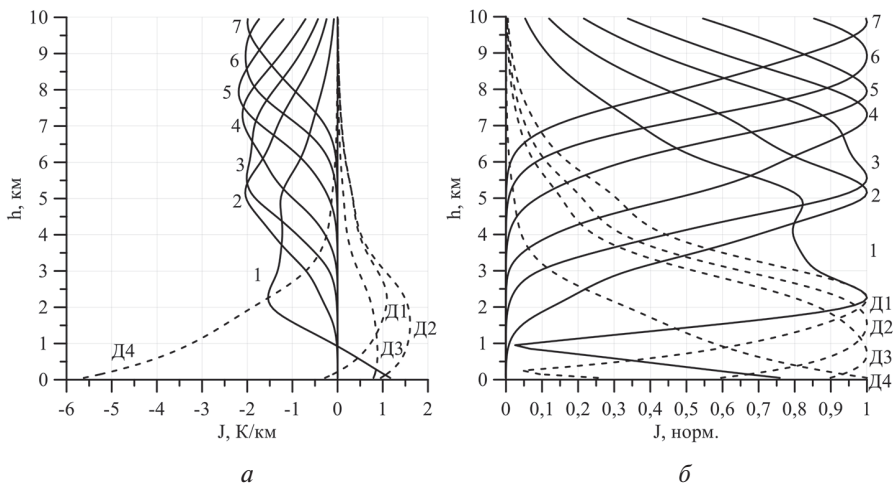


Рис. 4. Весовые функции влажностных каналов прибора МИРС КЭ «Конвергенция» для стандартной тропической атмосферы: *a* — ненормированные; *б* — нормированные. Частоты каналов (ГГц) — Д1: $\nu_1 = 24$, $\nu_2 = 25,5$; Д2: $\nu_1 = 24,5$, $\nu_2 = 26,5$; Д3: $\nu_1 = 25,5$, $\nu_2 = 26,5$; Д4: $\nu_1 = 18,7$, $\nu_2 = 26,5$; 1 — $183,31 \pm 7$; 2 — $183,31 \pm 4,5$; 3 — $183,31 \pm 4,5$; 4 — $183,31 \pm 3$; 5 — $183,31 \pm 1,8$; 6 — $183,31 \pm 1$; 7 — $183,31 \pm 0,3$

Дополнительные каналы имеют вертикальную поляризацию, полосу 500 МГц и следующие частоты: 24,0; 24,5; 25,5 и 26,5 ГГц. Расчётные оценки показывают, что применение дополнительных каналов в полосе 22,235 ГГц совместно с каналами в области 183,31 ГГц в КЭ «Конвергенция» может существенно улучшить восстановление профиля влажности на высотах от 0 до 4,5 км. Так, степени свободы при добавлении дополнительных каналов с использованием дифференциальных измерений возрастают на 1,1, или на 35–69 % даже при отсутствии информации об излучательных характеристиках подстилающей поверхности, что подтверждает их информативность. При этом погрешности восстановления профиля влажности на высотах 1–3 км уменьшаются на 50–10 %.

В главе 4 приводится исследование возможности восстановления глобальных трёхмерных полей водяного пара в атмосфере Земли на основе модельных данных КЭ «Конвергенция» и реальных данных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2). Показано, что для восстановления профиля влажности тропосферы может быть использована однослойная искусственная нейронная сеть (ИНС) прямого распространения. В качестве входных данных для ИНС не достаточно использовать только яркостную температуру каналов в области 183,31 ГГц. Кроме яркостной температуры на вход ИНС необходимо подавать профиль температуры атмосферы. Использование наряду с каналами в полосе 183,31 ГГц дополнительных радиометрических каналов в полосе 22,235 ГГц позволяет существенно уменьшить ошибку восстановления профиля влажности атмосферы на высотах от 1 до 4,5 км.

Моделирование показало, что в ходе КЭ «Конвергенция» с помощью ИНС можно восстанавливать профиль влажности атмосферы с относительной ошибкой мене 32 % на высотах от 0 до 10 км. Для этого используется однослойная ИНС прямого распространения со 100 нейронами в скрытом слое, имеющими сигмоидную передаточную функцию.

Радиометрические каналы МТВЗА-ГЯ 18,7 (В), 23,8 (В), 31,5 (В) ГГц позволяют получить две дифференциальных весовые функции, имеющие чувствительность и высотную избирательность к водяному пару на высотах 1,5–4,5 км. В качестве входной информации для ИНС при восстановлении профиля влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ нужно использовать значения яркостной температуры каналов 18,7 (В), 23,8 (В), 31,5 (В), $183,31 \pm 1,4$; $183,31 \pm 3,0$; $183,31 \pm 7,0$ ГГц и профиль температуры атмосферы, который может быть получен с помощью отдельной ИНС по яркостной температуре каналов 52,8–54,64 ГГц. Применение каналов 18,7 (В), 23,8 (В), 31,5 ГГц совместно с каналами 183,31 ГГц и профилем температуры атмосферы уменьшает ошибку восстановления профиля влажности на высотах от 1,5 до 4 км на 12–29 %.

Для восстановления профиля влажности атмосферы по данным МТВЗА ГЯ («Метеор-М» № 2 был разработан двухэтапный нейросетевой алгоритм, состоящий из двух последовательно соединённых однослойных ИНС прямого распространения. Первая ИНС восстанавливает профиль температуры атмосферы, вторая — влажности. ИНС для профиля влажности содержит 12 нейронов в скрытом слое с сигмоидной передаточной функцией. Такой алгоритм позволяет восстанавливать профиль абсолютной влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ в семи слоях с центрами от 0,6 до 8,6 км с относительной ошибкой от 5 до 45 %. Разработанный алгоритм позволил восстановить глобальные трёхмерные поля водяного пара в атмосферы Земли по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2 за 1,5 года с 01.05.2015 по 24.10.2016.

В заключении приведены основные результаты работы, которые подтверждают основные защищаемые положения диссертационного исследования:

1. Анализ данных судовых радиозондовых измерений и результаты моделирования микроволнового излучения системы океан – атмосфера показали, что из-за сильного поглощения вблизи линии 183,31 ГГц радиометрические измерения на типичном наборе частот 165,5–183,31 ГГц слабо чувствительны к изменению профиля влажности тропосферы ниже 4 км, где сосредоточена большая часть водяного пара. Это позволяет сделать вывод, что необходим поиск новых методов радиотеплового зондирования из космоса, которые могли бы обеспечить повышение точности восстановления профиля водяного пара в слое 1–4 км.
2. Теоретически исследована возможность применения нового подхода с применением дифференциальных радиотепловых измерений в полосе поглощения 22,235 ГГц для повышения точности восстановления профиля влажности в нижней тропосфере как при зондировании с поверхности Земли, так и из космоса. Подход заключается в вычитании сигналов близких пар частот вблизи линии 22,235 ГГц, в результате чего формируются весовые функции влажности, имеющие высотную избирательность. При зондировании профиля влажности с поверхности Земли дифференциальные весовые функции в диапазоне частот 18–27 ГГц при разнице частот 1 ГГц имеют максимумы на высотах от 0 до 2,8 км и амплитуду порядка 2 К/км. При зондировании из космоса максимумы дифференциальных весовых функций на частотах в диапазоне 18–27 ГГц располагаются на высотах от 0 до 3,5 км.
3. Проведён наземный эксперимент с использованием перестраиваемого радиометра 18–27,2 ГГц, который подтвердил возможности подхода дифференциальных радиотепловых измерений и показал,

что с его помощью можно восстанавливать профили влажности тропосферы с высотным разрешением 1 км. В ходе эксперимента наилучшие результаты восстановления с корреляцией между истинным и восстановленным профилем порядка 0,9 были получены на высотах от 1,5 до 6,5 км. При этом хорошо восстанавливаются не только близкие к стандартным –экспоненциальные профили, но и профили, имеющие инверсии.

4. Найдены оптимальные значения частот дополнительных радиотепловых каналов для измерения профиля влажности нижней тропосферы в ходе реализации КЭ «Конвергенция». Дополнительные каналы имеют вертикальную поляризацию и следующие частоты: 24,0; 25,5 и 26,5 ГГц. Расчётные оценки показывают, что применение дополнительных каналов в полосе 22,235 ГГц совместно с каналами в области 183,31 ГГц в КЭ «Конвергенция» может существенно улучшить восстановление профиля влажности на высотах от 0 до 4,5 км. Так, степени свободы при добавлении этих каналов возрастают на 1,1, или на 35–69 %, что подтверждает их информативность. При этом погрешности восстановления профиля влажности на высотах 1–3 км уменьшаются на 50–10 %.
5. На основе результатов моделирования радиометрических сигналов разрабатываемого прибора МИРС КЭ «Конвергенция» был создан алгоритм восстановления глобальных трёхмерных полей водяного пара с использованием искусственных нейронных сетей. Было показано, что в качестве входных данных для ИНС не достаточно использовать только яркостную температуру каналов в области 183,31 ГГц. Кроме яркостной температуры на вход ИНС необходимо подавать профиль температуры атмосферы.

Использование в качестве дополнительной входной информации для ИНС яркостной температуры дополнительных каналов МИРС КЭ «Конвергенция» в полосе 22,235 ГГц совместно с каналами 183,31 ГГц и профилем температуры позволят существенно (на 15 %) уменьшить ошибку восстановления профиля влажности атмосферы на высотах от 1 до 4,5 км. В результате было показано, что в ходе КЭ «Конвергенция» с помощью ИНС можно будет восстанавливать профиль влажности атмосферы с относительной ошибкой менее 32 % на высотах от 0 до 10 км. Для этого целесообразно использовать однослойную ИНС прямого распространения со 100 нейронами в скрытом слое, имеющими сигмоидную передаточную функцию.

6. Разработанный для КЭ «Конвергенция» подход, использующий ИНС, был применён для восстановления глобальных трёхмерных полей водяного пара на основе данных реального спутникового ра-

диотеплового комплекса МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2). Было показано, что радиометрические каналы МТВЗА-ГЯ 18,7 (В), 23,8 (В), 31,5 (В) ГГц позволяют получить две дифференциальные весовые функции и их использование повышает точность восстановления профиля влажности на высотах 1,5–4,5 км. Для восстановления профиля влажности тропосферы по данным МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) был разработан двухэтапный нейросетевой алгоритм, состоящий из двух последовательно соединённых однослойных ИНС прямого распространения. Первая ИНС восстанавливает профиль температуры атмосферы, вторая — влажности. ИНС для профиля влажности содержит 12 нейронов в скрытом слое с сигмоидной передаточной функцией. Такой алгоритм позволяет восстанавливать профиль абсолютной влажности атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ в семи слоях с центрами от 0,6 до 8,6 км с относительной ошибкой от 5 до 45 %.

Разработанный алгоритм впервые позволил восстановить глобальные трёхмерные поля водяного пара в атмосферы Земли по данным МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) за 1,5 года с 01.05.2015 по 24.10.2016.

Список публикаций в российских журналах, входящих в перечень ВАК

1. *Садовский И. Н., Шарков Е. А., Кузьмин А. В., Пашинов Е. В., Сазонов Д. С.* Обзор моделей комплексной диэлектрической проницаемости водной среды, применяемых в практике дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 79–93.
2. *Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Поспелов М. Н., Сазонов Д. С., Пашинов Е. В.* Экспериментальные исследования коротковолновой части спектра ветровых волн. Предварительный анализ результатов дистанционных радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 55–67.
3. *Стерлядкин В. В., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.* Дифференциальные радиотепловые методы восстановления профиля влажности атмосферы с борта космических аппаратов // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 64–76.
4. *Стерлядкин В. В., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.* Влияние подстилающей поверхности на точность дифференциальных радиометрических измерений профиля водяного пара в нижней тропосфере со спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 268–277.
5. *Пашинов Е. В.* Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 225–235.
6. *Шарков Е. А., Кузьмин А. В., Веденькин Н. Н., Jeong S., Ермаков Д. М., Квитка В. Е., Козлова Т. О., Комарова Н. Ю., Минаев П. Ю., Park П. Н., Пашинов Е. В., Позаненко А. С., Прасолов В. О., Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Стерлядкин В. В.,*

Халин Ю. Б., Hong G., Черненко А. М. Космический эксперимент «Конвергенция»: научные задачи, бортовая аппаратура, методики решения обратных задач // Исследование Земли из космоса. 2018. № 4. С. 71–96.

7. *Sterlyadkin V. V., Pashinov E. V., Kuzmin A. V., Sharkov E. A.* Differential Radiothermal Methods for Satellite Retrieval of Atmospheric Humidity Profile // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. No. 9. P. 979–990.
8. **Пашинов Е. В.** Космический эксперимент «Конвергенция»: восстановление профиля водяного пара атмосферы с помощью искусственных нейронных сетей // Исследование Земли из космоса. 2019. № 6. С. 28–40.

Список публикаций в трудах международных конференций

1. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Исследование возможности восстановления профиля влажности атмосферы по спутниковым микроволновым измерениям // Сб. докл. III Всероссийской Микроволновой конф. 2015. С. 236–240.
2. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А., Садовский И. Н.** Исследование возможности влажностного зондирования атмосферы по спутниковым микроволновым измерениям // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии — ФРЭМЭ'2016: докл. XII Международной научной конф. с научной молодежной сессией. С. 194–198.
3. *Садовский И. Н., Пашинов Е. В.* Оценка влияния ветрового волнения на результаты измерения яркостной температуры системы океан–атмосфера из космоса // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии — ФРЭМЭ'2016: докл. XII Международной научной конф. с научной молодежной сессией. 2016. С. 202–205.
4. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А., Садовский И. Н.** Восстановление интегрального паросодержания атмосферы и водозапаса облачности в проекте КЭ «Конвергенция» // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: тр. XIII Международной научной конф. с научной молодежной школой имени И. Н. Спиридонова. В 2-х кн. 2018. С. 331–335.
5. **Пашинов Е. В., Селунский А. Б., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А., Садовский И. Н.** Восстановление профилей температуры и влажности в проекте КЭ «Конвергенция» // Тр. 13 й Международной научной конф. ФРЭМЭ'2018. 2018. С. 335–339.

Список публикаций в трудах конференций

1. **Пашинов Е. В., Шарков Е. А., Садовский И. Н.** Сравнение результатов восстановления полей водяного пара в атмосфере Земли по данным прибора SSM/I с использованием шести различных алгоритмов // 11-я открытая Всероссийская конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН. 11–15 нояб. 2013: тез. докл. 2013. С. 287.
2. *Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Пашинов Е. В.* Рекомендации по выбору модели КДП для решения задач дистанционного зондирования экваторий на частотах 9,5; 35,5; 47,78 и 75,5 ГГц // 11-я Всероссийская открытая ежегодная конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11–15 нояб. 2013: тез. докл. 2013. С. 263.
3. **Пашинов Е. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А., Садовский И. Н.** Моделирование излучения стандартной тропической атмосферы в диапазоне 6–200 ГГц. // 12-я открытая Всероссийская конф. «Современные проблемы дистанцион-

- ного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН. 10–14 нояб. 2014: тез. докл. 2014. С. 203.
4. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Оценка возможности восстановления профиля влажности атмосферы по спутниковым микроволновым измерениям в линии 183,31 ГГц // 13-я открытая Всероссийская конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН. 16–20 нояб. 2015: тез. докл. 2015. С. 211.
 5. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Дифференциальные радиометрические измерения профиля водяного пара в атмосфере Земли // 14-я открытая Всероссийская конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН. 14–18 нояб. 2016: тез. докл. 2016. С. 185.
 6. **Пашинов Е. В., Садовский И. Н.** Выбор алгоритма для решения задачи восстановления полей водяного пара в атмосфере Земли по данным дистанционного зондирования // 10-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённая Дню космонавтики: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 100.
 7. **Пашинов Е. В., Шарков Е. А., Садовский И. Н.** Особенности работы шести алгоритмов восстановления интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора SSM/I в условиях невозмущённой атмосферы // 11-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 78.
 8. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Разработка методики определения вариаций профиля водяного пара по данным многочастотного радиотеплового зондирования // 12-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 96.
 9. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Восстановление профиля влажности атмосферы Земли с использованием дифференциальных радиотепловых измерений // 13-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 76.
 10. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Дифференциальные микроволновые измерения профиля водяного пара атмосферы над взволнованной поверхностью океана // 14-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 93.
 11. **Стерлядкин В. В., Сазонов Д. С., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В.** Описание алгоритма определения направления поверхностного ветра по радиометрическим измерениям из космоса // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2017. С. 468.
 12. **Стерлядкин В. В., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Температурно-влажностное зондирование атмосферы в проекте КЭ «Конвергенция» // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2017. С. 467.
 13. **Селунский А. Б., Кузьмин А. В., Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Хохлова А. В.** Восстановление профилей температуры и влажности тропосферы методом нейронных сетей // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2017. С. 466.
 14. **Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.** Измерение интегральных характеристик атмосферы в проекте КЭ «Конвергенция»

- // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2017. С. 461.
15. Кузьмин А. В., Пашинов Е. В., Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Стерлядкин В. В., Хапин Ю. Б., Шарков Е. А. Научная аппаратура космического эксперимента «Конвергенция» на РС МКС // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2017. С. 460.
 16. Sterlyadkin V. V., Pashinov E. V., Kuzmin A. V., Sharkov E. A. Reconstruction of Water Vapor Profile in the Lower Troposphere by Differential Radiometric Measurements from Satellites: abstr. // PIERS 2017. P. 323.
 17. Пашинов Е. В. Алгоритм восстановления интегрального паросодержания атмосферы по данным микроволнового прибора МТВЗА-ГЯ (Метеор-М №2) // 15-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 86. (CD-ROM)
 18. Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В., Шарков Е. А. Исследование возможности восстановления инверсий профиля влажности атмосферы в ходе проекта КЭ «Конвергенция» // 16-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2018. С. 142.
 19. Селунский А. Б., Кузьмин А. В., Садовский И. Н., Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Хохлова А. В. Обратная задача для восстановления профилей температуры и влажности тропосферы. Метод нейронных сетей // 16-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2018. С. 148.
 20. Кузьмин А. В., Козлова Т. О., Пашинов Е. В., Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Селунский А. Б., Стерлядкин В. В., Хапин Ю. Б. Микроволновый радиометр-спектрометр МИРС в космическом эксперименте «Конвергенция» (результаты эскизного проекта) // 16-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2018. С. 138.
 21. Кузьмин А. В., Веденькин Н., Квитка В. Е., Козлова Т. О., Минаев П. Ю., Пашинов Е. В., Позаненко А. С., Прасолов В. О., Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Селунский А. Б., Стерлядкин В. В., Хапин Ю. Б., Черненко А. М., Шарков Е. А. Космический эксперимент «Конвергенция»: эскизный проект научной аппаратуры // 16-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2018. С. 137.
 22. Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Шарков Е. А. Экспериментальная проверка дифференциального радиометрического метода определения профиля влажности атмосферы // 16-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 133–134.
 23. Пашинов Е. В., Стерлядкин В. В., Сазонов Д. С., Селунский А. Б., Кузьмин А. В., Шарков Е. А. Нейросетевой алгоритм восстановления профиля влажности атмосферы по данным КЭ «Конвергенция» // 17-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. ИКИ РАН. 2019. С. 53.

055(02)2

ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 18.03.2022

Заказ 4190

Формат 60×84/16

Тираж 100

1,16 усл.-печ. л.

