

На правах рукописи



Егоров Доброслав Павлович

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ АТМОСФЕРЫ И
УЧЕТ ИХ ВЛИЯНИЯ ПРИ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКОМ
ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

1.3.4. – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Научный руководитель: Кутуза Борис Георгиевич,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Радиофизические методы в аэрокосмических исследованиях природно-техногенной среды» Московской части ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Официальные оппоненты:

Гайкович Константин Павлович,

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН»

Горбунов Михаил Евгеньевич,

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Турбулентность и распространение волн» Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, ведущий научный сотрудник Гидрометцентра России

Ведущая организация: ФГБНУ «Институт космических исследований РАН»

Защита состоится 12 апреля 2024 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 на базе ФГБНУ «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/EgorovDP/disser.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.111.02,
доктор физико-математических наук



Кузьмин Лев Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Исследования радиационных свойств земной атмосферы были изначально продиктованы необходимостью учета ее влияния на распространение электромагнитного излучения в ходе радиоастрономических наблюдений планет солнечной системы, изучения их температурных режимов. Атмосфера Земли рассматривалась лишь в роли мешающего фактора, приводящего к осложнениям при настройке и использовании чувствительной измерительной аппаратуры пассивного дистанционного зондирования – радиометров. Значительный уровень поглощения микроволнового излучения в нижнем слое тропосферы, вызванный влажностью воздуха и водностью облаков, затрудняет проведение микроволновых радиоастрономических наблюдений с равнины. Причем поглощение в облаках и других гидрометеорах может быть настолько большим, что даже в высокогорных районах такие наблюдения осуществляются по возможности в ясную погоду. В связи с этим исследователей прежде всего интересовали излучательные и поглощательные характеристики ясного неба и входящих в состав воздуха атмосферных газов. Известно, что при формировании и распространении микроволнового излучения в безоблачной атмосфере наибольший вклад вносят водяной пар и кислород. Теоретический расчет спектров поглощения миллиметровых и сантиметровых волн в молекулярном кислороде и водяном паре впервые проведен Ван Флеком в 1947 г. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования микроволнового излучения безоблачной атмосферы, проведенные в 1950-х годах Жевакиным С.А., Троицким В.С. и Наумовым А.П. в Научно-исследовательском радиофизическом Институте (НИРФИ), а также рядом зарубежных авторов, имели большое значение для становления микроволновой радиометрии.

Первые целенаправленные экспериментальные исследования микроволнового излучения гидрометеоров, включая облака и осадки, начались в 1961 г. по инициативе и под руководством Анатолия Евгеньевича Башаринова, который предвидел, что развитие радиометров и накопленный опыт постепенно приведут к пониманию возможностей радиометрического метода как метода дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА) в частности. Действительно, радиометрический метод вскоре демонстрирует большой потенциал. В следующие 10-15 лет наблюдается стремительный прогресс в разработке методики и алгоритмов радиометрического восстановления различных метеорологических параметров атмосферы Земли путем дистанционного измерения и анализа уровня ее собственного радиотеплового излучения. Исследования проводятся в НИРФИ, в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО), Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО),

Институте физики атмосферы, Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Помимо пунктов наземных наблюдений, радиометрами начинают оснащать и самолеты-лаборатории с целью дистанционного зондирования уже не только атмосферы, но и поверхности Земли. В результате по вариациям антенной температуры, регистрируемой радиометрами, удается идентифицировать и измерить количественно изменения влажности почвогрунтов, эволюцию структуры ледовых и снежных покровов, колебания степени солености вод, волнение водной поверхности и т.д. Все это показывает эффективность радиометрического метода и необходимость дальнейшего усовершенствования аппаратуры. Дополнительным толчком послужил первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами – искусственный спутник Земли «Космос-243», выведенный на орбиту 23 сентября 1968 г. Полученный опыт имел неограниченное значение для дальнейшего развития микроволновой радиометрии¹. Руководителями этого эксперимента были Башаринов А.Е., Гурвич А.С. и Егоров С.Т. Спутник «Космос-243» более чем на четыре года опередил американский аналог «Nimbus-5».

В то же время повышение чувствительности радиометров, снижение уровня шумов во входных трактах за счет улучшения характеристик малошумящих усилителей позволяли проводить наблюдения все более слабых источников излучения для нужд радиоастрономии. Однако флуктуации регистрируемой радиометром антенной температуры вызваны, очевидно, не только собственными шумами измерительной аппаратуры и наблюдаемым источником, но также флуктуациями радиоизлучения атмосферы Земли, попадающего в главный и боковые лепестки диаграммы направленности антенны (ДНА). Флуктуации излучения атмосферы обусловлены пространственными и временными неоднородностями полей метеорологических параметров (влажности, водности, температуры воздуха, фазового состава облаков и др.), которые возникают из-за турбулентных движений в тропосфере. Характер и интенсивность этих флуктуаций зависят от метеорологического состояния атмосферы. Дальнейшее повышение качества, в частности, радиоастрономических наблюдений было бы невозможным без понимания природы этой зависимости. Первые экспериментальные исследования флуктуаций атмосферного поглощения и влагосодержания² были проведены в 1970 г. на радиотелескопе РТ-22 ФИАН (с пространственным разрешением 22 м). Для длин волн 0.8 и 1.35 см исследование пространственных флуктуаций вскоре было продолжено с помощью самолета-лаборатории ИЛ-18, а временных – с наземных наблюдательных пунктов (1976 г.).

¹ Горбунов М.Е., Кутуза Б.Г. «Космос-243» – начало развития методов микроволновой радиометрии атмосферы и поверхности Земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 321-329.

² Кутуза Б.Г. Исследование флуктуаций полной массы водяного пара в атмосфере радиоастрономическим методом // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Т. 10. № 11. С. 1148-1156.

Полученные данные подтвердили, что флуктуации поглощения атмосферы и яркостной температуры ее излучения вызваны изменчивостью полей влажности и скорости ветра.

В настоящее время микроволновая радиометрия по-прежнему остается наиболее универсальной технологией, позволяющей дистанционно и оперативно определять характеристики атмосферы и поверхности Земли. Основным достоинством микроволновой или СВЧ (сверхвысокочастотной) радиометрии среди других методов ДЗЗ и ДЗА является возможность при корректном выборе диапазона частот получать ценную информацию о состоянии атмосферы и поверхности Земли практически при любых погодных условиях, в любое время суток вне зависимости от освещенности или наличия облачности.

Путем дистанционных измерений нисходящего (при наблюдениях с поверхности Земли) излучения атмосферы или уходящего (при зондировании со спутников) излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в микроволновом диапазоне, дальнейшей цифровой обработки накопленных данных измерений и решения соответствующих обратных задач ДЗА в результате возможно определить^{3,4}: интегральные параметры влаго- и водосодержания атмосферы (полную массу водяного пара, водозапас облаков), температуру облаков; температурный профиль – высотное распределение температуры в атмосфере; содержание и высотные распределения водяного пара, различных малых газовых составляющих (озона, окислов углерода, азота и др.); интенсивность выпадения жидких осадков (дождя). Перечисленные параметры имеют первостепенное значение при решении широкого круга задач метеорологии, климатологии, астрономии и физики облаков. Это определяет актуальность и практическую значимость теоретических и экспериментальных исследований в области СВЧ-радиометрии.

Важнейшим направлением исследований при этом является развитие существующих и разработка новых методов и алгоритмов восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы, определения интегральных параметров ее влаго- и водосодержания, играющих ключевую роль в прогнозировании различных атмосферных процессов, погоды и климата. Проблема повышения точности их восстановления остается актуальной, так как от этого напрямую зависит качество мониторинга состояния окружающей среды и метеорологических прогнозов⁵. Особенно актуальны проблемы сверхсрочного прогноза осадков, гроз и опасных метеорологических явлений.

³ Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеониздат, 1987. – 283 с.

⁴ Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 336 с.

⁵ Ermakov D.M. Satellite radiothermvision of atmospheric processes: method and applications. – Springer Praxis Books, 2021. – 225 p.

При дистанционном зондировании облачной атмосферы с поверхности Земли обычно элемент пространственного разрешения антенны СВЧ радиометра намного меньше эффективного горизонтального размера облака. В то же время действующие спутниковые радиометры в диапазоне длин волн 0.3-4.5 см обладают пространственным разрешением от 5 до 60 км (в зависимости от длины волны), что значительно больше горизонтальных размеров облаков кучевого типа, основных переносчиков воды в ее жидкокапельной фазе, в том числе даже больше горизонтальных размеров мощных кучевых облаков *Cu cong.* При решении обратных задач ДЗА, как правило, облака рассматриваются в приближении однородного сплошного слоя или же принимается горизонтально-однородная плоскостойкая модель. Оба приближения игнорируют зачастую разрывную и неоднородную структуру реальных облачных полей: предполагается равномерное распределение жидкокапельной влаги по площади элемента разрешения антенны. Учитывая нелинейность зависимости *уровня* яркостной температуры излучения атмосферы от водозаписа облаков, эта особенность должна приводить к систематическим ошибкам в определении усредненных по элементу разрешения радиометра интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы, а также при восстановлении температурно-влажностных профилей. При этом полноценный анализ влияния характера пространственного распределения облаков на упомянутые ошибки в литературе не проводился.

Одним из основных направлений также представляется исследование влияния состояния атмосферы, полей ее метеорологических параметров на характер и интенсивность *флуктуаций* микроволнового излучения. Флуктуации радиоизлучения, возникающие из-за атмосферных неоднородностей, необходимо учитывать при создании систем дистанционного зондирования Земли, космической навигации и широкополосных систем связи. Они также оказывают влияние на качество радиометрических измерений и радиоастрономических наблюдений. В то время как в радиоастрономии флуктуации являются проблемой, для физики атмосферы они представляют особый интерес, поскольку позволяют оценить характеристики тропосферной турбулентности⁶.

Несмотря на проведенные исследования в области СВЧ-радиометрии атмосферы, ряд вопросов, связанных с ролью отдельных метеорологических факторов, пространственной неоднородностью полей распределения водяного пара и облачности, интенсивностью флуктуаций излучения на разных длинах волн и при больших пространственно-временных интервалах, остается нерешенным.

⁶ Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.

Целью данной диссертационной работы является получение новых данных о неоднородностях радиоизлучения атмосферы на длительных временных интервалах, а также исследование влияния характера пространственного распределения облаков на точность решения обратных задач при СВЧ-радиометрическом зондировании Земли из космоса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Постановка и проведение вычислительного эксперимента по решению прямой задачи расчета пространственных полей яркостной температуры нисходящего излучения облачной атмосферы и уходящего излучения системы «облачная атмосфера – подстилающая поверхность» с учетом заданной динамики 3D распределений метеорологических параметров. Программная реализация трехмерной модели поля разрывной кучевой облачности, спектральных моделей поглощения в облачной атмосфере с использованием технологии неспециализированных вычислений на графических процессорах (GPU).
2. Проведение экспериментальных исследований временных флуктуаций собственного нисходящего излучения атмосферы – длительных (от 2 до 5 часов) сеансов непрерывных измерений спектра яркостной температуры вблизи линии резонансного поглощения водяного пара 22.235 ± 5 ГГц (К-диапазон). Обработка накопленного массива данных, включая калибровку измерений и расчет структурных функций яркостной температуры в широком диапазоне временных интервалов от 11 до 600 и более сек. Разработка соответствующих программных инструментов. Анализ полученных структурных функций, поиск взаимосвязи со значениями метеопараметров и погодными условиями наблюдений.
3. Оценка точности двухчастотного метода решения обратной задачи восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы, в том числе по данным проведенных измерений. Разработка и анализ точности многочастотного метода. Теоретический расчет максимальных погрешностей определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков как косвенных величин в зависимости от ошибки измерения уровня яркостной температуры, а также ошибок, допущенных при оценке значений таких модельных параметров, как средняя абсолютная температура атмосферы и эффективная температура слоя облачности. Анализ устойчивости методов к высотной изменчивости профилей температуры, давления и влажности воздуха и к отклонениям этих профилей от соответствующих стандартных высотных распределений с привлечением независимых данных радиозондирования.

4. Исследование систематических ошибок восстановления влаго- и водосодержания атмосферы, возникающих из-за неучета пространственного распределения кучевых облаков в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра и нелинейности взаимосвязи яркостной температуры с водностью и термодинамической температурой облака.

Научная новизна:

- В процессе проведения 4-х летнего цикла непрерывных наблюдений получены новые данные о сезонной изменчивости спектра яркостной температуры атмосферы (18–27.2 ГГц) и о значениях интегральных параметров влаго- и водосодержания.
- В широком диапазоне погодных условий впервые получены частотные спектры временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы на интервалах от 100 до 600 сек. Впервые показано, что частотный спектр интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения ясного неба в К-диапазоне повторяет форму частотного спектра поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы.
- С использованием средств языков C++, Python и программно-аппаратной архитектуры CUDA разработаны новые программные библиотеки для решения прямой и некоторых обратных задач ДЗА. Разработан алгоритм автоматической классификации сеансов СВЧ-радиометрических измерений по типу наблюдаемой облачности путем анализа частотных спектров структурной функции яркостной температуры на фиксированных временных интервалах.
- Впервые рассмотрено влияние параметров облаков, характеризующих их пространственное распределение (согласно модели Планка), на ошибки восстановления полной массы водяного пара и водозапаса по усредненному в поле зрения спутникового микроволнового радиометра радиотепловому излучению.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в рамках проведенного исследования данные о флуктуациях яркостной температуры микроволнового излучения могут быть полезны для оценки пространственно-временных флуктуаций фазового запаздывания сигналов в атмосфере. Результаты работы могут найти применение в радиоастрономии для учета влияния атмосферы при радиоинтерферометрических измерениях и при наблюдениях источников излучения в режиме диаграммной модуляции. Полученные данные могут представлять интерес для спутниковых систем связи и навигации, радиолокационной интерферометрии и интерферометрии со сверхдлинной базой. Разработанные автором программные инструменты применяются в ИРЭ РАН и ФИРЭ РАН для обработки и анализа

данных СВЧ-радиометрических измерений, модельного расчета спектров поглощения и яркостной температуры атмосферы. Разработанные алгоритмы могут быть использованы при создании программного обеспечения для обработки и интерпретации спутниковых данных. Полученные в ходе диссертационного исследования результаты свидетельствуют о возможности существенного повышения эффективности решения обратных задач восстановления температурно-влажностных профилей, а также влаго- и водозаписа атмосферы по данным СВЧ-радиометрических наблюдений за счет введения в расчетные модели температур на вершине облаков и на уровне подстилающей поверхности, высоты верхней кромки облаков, бинарной маски облачности и пространственного распределения ее фазового состава в поле зрения антенны.

Методология и методы исследования. Эксперимент по измерению временных флуктуаций яркостной температуры проведен для нисходящей компоненты микроволнового излучения атмосферы в К-диапазоне с помощью наземного СВЧ радиометра-спектрометра с элементом пространственного разрешения антенны порядка 200 м (для высоты 2.1 км), что согласно теории Колмогорова-Обухова соответствует примерно середине инерционного интервала масштабов неоднородностей и поэтому позволяет исследовать тонкую структуру полей как влагосодержания, так и водосодержания атмосферы. Анализ флуктуационной изменчивости яркостной температуры в различных погодных условиях выполнен с использованием аппарата структурных функций, введенных взамен корреляционных для работы со случайными нестационарными процессами. Улучшенная флуктуационная чувствительность и высокая температурная стабильность коэффициента усиления антенны СВЧ радиометра-спектрометра позволили проводить длительные сеансы непрерывных наблюдений и получать значения структурной функции для больших временных интервалов. Длительность сеансов и величины рассматриваемых временных интервалов при переходе к пространственным интервалам сравнимы с размерами полей зрения антенн современных спутниковых СВЧ-радиометров.

Оценка систематических ошибок восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания по уходящему излучению системы «облачная атмосфера – подстилающая поверхность» проведена для гладкой водной поверхности в качестве подстилающей путем многократного решения прямой задачи моделирования пространственного поля яркостной температуры по заданным распределениям метеорологических параметров и водности облаков в трехмерной расчетной области, а затем обратной задачи с учетом размеров элемента разрешения антенны спутникового СВЧ-радиометра. При этом в моделируемой области атмосферы рассматриваются различные пространственные реализации облачных полей, соответствующие статистической модели В.Г. Планка для разрывной кучевой облачности.

Высотный профиль влажности внутри кучевого облака аппроксимируется согласно модели И.П. Мазина. Расчет яркостных температур производится прямым численным интегрированием методом Буля. Для решения обратной задачи используются двухчастотный СВЧ-радиометрический метод, а также разработанный многочастотный метод (основанный на применении метода наименьших квадратов). Расчеты проводятся с использованием технологии неспециализированных вычислений на графических процессорах.

Положения, выносимые на защиту

1. Монотонный рост структурной функции яркостной температуры нисходящего излучения ясного неба на временных интервалах 600 и более секунд (без насыщения) свидетельствует о наличии в безоблачной атмосфере крупных горизонтально-вытянутых неоднородностей размером, превышающим 6 км. Частотный спектр интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры ясного неба в К-диапазоне подобен частотному спектру поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы.
2. Анализ частотных спектров яркостной температуры и ее пространственно-временной изменчивости позволяет определить тип облачности, наблюдаемой в поле зрения наземного радиометра. Зависимость структурной функции от временного интервала позволяет оценить средний горизонтальный размер облака в ансамбле кучевых облаков.
3. Яркостная температура, регистрируемая в элементе разрешения используемых в настоящее время спутниковых микроволновых радиометров, при наличии кучевой облачности меньше яркостной температуры эквивалентного по водозапасу сплошного облачного слоя. В случае мощных, развитых по вертикали кучевых облаков такое различие становится существенным и (в К- и Ка-диапазонах) достигает 10 К.
4. На ошибки восстановления влагозапаса и водозапаса, связанные с нелинейностью зависимости яркостной температуры от влажности и термодинамической температуры облака, оказывает влияние характер пространственного распределения облаков в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра. Для случая кучевых облаков при размере элемента разрешения от 10×10 км относительная ошибка восстановления этих интегральных параметров может превышать 10-15%.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью и теоретической обоснованностью используемых методов решения прямых и обратных задач ДЗА, известных

как в российской, так и в зарубежной литературе; применением современных методов и алгоритмов математического моделирования задач; проведением натуральных и вычислительных экспериментов с достаточной воспроизводимостью. При этом результаты вычислительных экспериментов находятся в удовлетворительном согласии с данными натуральных экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- XXVI Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» – КФУ, Казань (2019 г.);
- XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» – БФУ им. И. Канта, Калининград (2021 г.);
- Всероссийских открытых научных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» в рамках Арmandовских чтений – МИ ВлГУ, Муром (2018, 2019, 2020, 2021 и 2022 гг.);
- VI и VII Всероссийских научных конференциях «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург (2020 и 2022 гг.);
- XI, XII, XIII, XIV и XV Всероссийских научно-технических конференциях «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва (2017, 2018, 2019, 2020 и 2022 гг.);
- Всероссийской научной конференции «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» – ИФА им. А. М. Обухова РАН, Москва (2020 г.);
- X научно-практическом семинаре «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике» – МИ ВлГУ, Муром (2019 г.);
- XIX, XX и XXI Международных научных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – ИКИ РАН, Москва (2021, 2022 и 2023 гг.);
- XIX Международной научной конференции «Цивилизация знаний» – РосНОУ, Москва (2018 г.);
- XVI Международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии» – Объединенный институт ядерных исследований, Дубна (2022 г.);
- XXXII Международной научной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – СевГУ, Севастополь (2022 г.);

- XV Международной научной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» – НТЦ УП РАН, Москва (2022 г.);
- Международной научной конференции «Суперкомпьютерные дни в России» – МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва (2022 г.);
- 41st Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) – University of Rome «La Sapienza», Italy (2019 г.);
- 45st Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) – Hangzhou, China (2021 г.);
- International Radiation Symposium (IRS) – IAMAS, Thessaloniki, Greece (2022 г.).

Личный вклад. Результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении натурных экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных. Автору диссертации принадлежит разработка программных инструментов для калибровки данных измерений, расчета частотных спектров структурных функций яркостной температуры, расчета пространственных полей яркостной температуры излучения облачной атмосферы с учетом заданной динамики 3D распределений ее метеорологических параметров, решения обратной задачи восстановления влаго- и водосодержания атмосферы.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с научными планами Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в рамках государственного задания по теме № 0030-2019-0008 «Космос», наименование НИР «Разработка радиофизических методов и средств для исследования и дистанционного зондирования природных объектов, околоземного космического пространства и объектов Солнечной системы». Автор являлся основным исполнителем работ в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 20-02-00703 А «Развитие радиофизических методов дистанционного зондирования Земли».

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 39 печатных изданиях, 8 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 12 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 114 страниц, включая 37 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена степень разработанности проблемы. Поставлена цель и определены задачи диссертационной работы, методы исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Обозначены научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации и публикациях полученных результатов. Описана общая структура диссертационной работы.

В **первой главе** изложены физические основы моделирования собственного нисходящего излучения облачной атмосферы и уходящего излучения системы «облачная атмосфера – подстилающая поверхность» в микроволновом диапазоне. Рассмотрены существующие модели среднегодовой глобальной стандартной атмосферы. Приведены некоторые спектральные модели поглощения микроволнового излучения в безоблачной атмосфере. Для диапазона частот ν от 5 до 350 ГГц представлены спектры погонных коэффициентов поглощения в сухом воздухе и водяном паре в приповерхностном слое атмосферы при стандартных условиях (температура воздуха 15°C, атмосферное давление 1013.25 гПа, абсолютная влажность 7.5 г/м³), рассчитанные методом суммирования спектральных линий с учетом интерференции и зеемановского расщепления линий кислорода, доплеровского расширения линий водяного пара, дебаевского спектра кислорода на частотах ниже 10 ГГц и затухания за счет азота на частотах свыше 100 ГГц. Рассмотрено влияние изменчивости высотного распределения (профиля) температуры воздуха в атмосфере на весовую функцию поглощения в водяном паре (весовую функцию Стилина).

Ослабление микроволнового излучения в жидкокапельных водяных облаках рассматривается в рэлеевском приближении (размеры облачных частиц меньше 80 мкм). Облака предполагаются коллоидально-устойчивыми. Кристаллические облака в рамках данной работы рассмотрены не были ввиду их относительно слабого влияния на перенос СВЧ излучения. Проведено сравнение «одномерной» и «двумерной» моделей Дебая для комплексной диэлектрической проницаемости воды нулевой солености при температурах –5°C и 25°C. Выполнен сравнительный анализ известных моделей расчета весового коэффициента поглощения в облаке k_w , включая уточненную на основе последних экспериментальных данных модель МСЭ – Международного Союза Электросвязи. Относительная ошибка $\Delta k_w/k_w$ в %, вызванная изменением эффективной температуры облака на –1°C, приведена на рис. 1.

Среди прочих видов облаков основными переносчиками воды в ее жидкокапельной фазе являются кучевые облака (Cu – cumulus). Высотное распределение водности в кучевом

облаке приближенно описывается моделью И.П.Мазина⁷ и задается следующими выражениями

$$w_*(\xi) = w_*(\xi_0) \cdot \frac{\xi^{\mu_0}(1-\xi)^{\psi_0}}{\xi_0^{\mu_0}(1-\xi_0)^{\psi_0}} = \frac{W}{H} \cdot \frac{\Gamma(2 + \mu_0 + \psi_0)}{\Gamma(1 + \mu_0)\Gamma(1 + \psi_0)} \cdot \xi^{\mu_0}(1-\xi)^{\psi_0}, \quad (1)$$

где $\xi = h/H$ – приведенная высота внутри облака, H – мощность облака (км), W – интегральный водозапас облака ($\text{кг}/\text{м}^2$), $w_*(\xi)$ – профиль водности ($\text{кг}/\text{м}^3$), Γ – гамма-функция, $w_*(\xi_0)$ – максимальная водность облака, ξ_0 – приведенная высота максимальной водности, μ_0 и ψ_0 – безразмерные параметры. Средние значения $\mu_0 = 3.27$, $\psi_0 = 0.67$, $\xi_0 = 0.83$.

На основе имеющихся табличных данных^{3,8} построена степенная регрессия интегрального водозаписа облака W по величине его мощности H (вертикальной протяженности): $W = 0.133 \cdot H^{2.3}$.

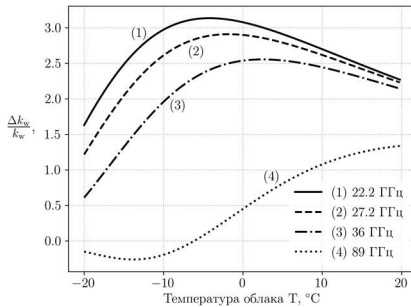


Рис. 1. Относительная ошибка $\Delta k_w/k_w$ в %, вызванная изменением эффективной температуры облака на -1°C

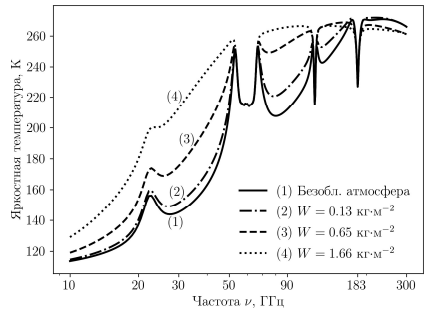


Рис. 2. Яркостная температура уходящего в направлении зенита излучения системы «атмосфера – гладкая водная поверхность»

Проведен прямой расчет спектра яркостной температуры уходящего в направлении зенита излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в диапазоне частот от 10 до 300 ГГц (см. рис. 2). В качестве подстилающей рассмотрена гладкая водная поверхность при нулевой солёности и температуре 15°C . Случай безоблачной атмосферы соответствует кривой (1). Кривые (2)–(4) получены в предположении горизонтально-однородного слоя облачности с высотой нижней границы 1.1 км и мощностью (2) $H = 1$ км, (3) $H = 2$ км и (4) $H = 3$ км. Высотные распределения температуры, давления и влажности соответствуют стандартным, тогда как профиль водности внутри облачного слоя задается согласно модели Мазина⁷. Спектр яркостной температуры претерпевает значительные изменения с ростом величины водозаписа. Большую роль играет выбор угла наблюдения (см. рис. 3). На рис. 3

⁷ Войт Ф.Л., Мазин И.П. Водность кучевых облаков // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1972. Т. 8. № 11. С. 1166-1176.

⁸ Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г. Радиотепловое излучение облаков // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. № 9. С. 1792-1806.

кривые (1), (3) и (5) соответствуют горизонтальной поляризации излучения; кривые (2), (4) и (6) – вертикальной поляризации.

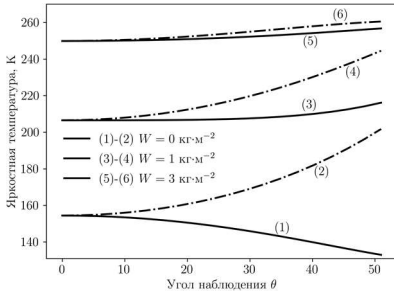


Рис. 3. Яркостная температура уходящего излучения системы «облачная атмосфера – гладкая водная поверхность», $\nu = 36$ ГГц, в зависимости от угла наблюдения θ

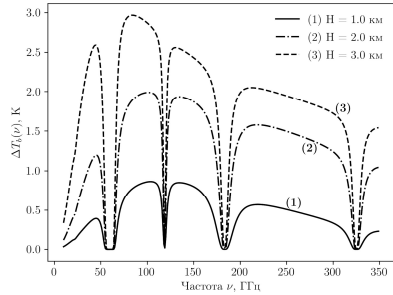


Рис. 4. Разность значений $\Delta T_b^*(\nu)$ для диапазона частот ν от 10 до 350 ГГц при различной мощности H (км) облачного слоя

Показано, что яркостная температура $T_b^*(\nu)$ эквивалентного по водозапасу сплошного слоя облачности, внутри которого водность постоянна и не зависит от высоты, при прочих равных условиях выше яркостной температуры $T_b(\nu)$ горизонтально-однородного облачного слоя, водность которого распределена по высоте согласно модели Мазина (1). На рис. 4 представлена разность этих значений $\Delta T_b^*(\nu) = T_b^*(\nu) - T_b(\nu)$ для частот ν от 10 до 350 ГГц при различной мощности H (км) облачного слоя (для уходящего излучения). Температура гладкой водной поверхности установлена равной 15°C, нулевая соленость. Высота нижней границы облачного слоя принята равной 1.1 км. Высотные профили температуры, давления и влажности воздуха соответствуют модели стандартной атмосферы МСЭ.

Во второй главе рассмотрены результаты эксперимента (2017-2023 гг.) по измерению яркостной температуры нисходящей компоненты излучения атмосферы в диапазоне резонансного поглощения водяного пара 18–27.2 ГГц. Спектры яркостной температуры получены с помощью специального многоканального микроволнового радиометра-спектрометра «Р22М», разработанного в СКБ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН под руководством С.Ю. Турыгина. Радиометр обладает улучшенной флуктуационной чувствительностью (0.02 К при постоянной времени 0.3 с) и высокой температурной стабильностью коэффициента усиления антенны, что позволило проводить длительные сеансы непрерывных наблюдений (от 2 до 5 часов) и исследовать неоднородности излучения атмосферы на больших временных интервалах. Основные характеристики радиометра приведены в таблице 1.

Изложена методика проведения измерений и калибровки данных. В дополнение к данным радиометрии проводилась видеосъемка текущих погодных условий, а также

регистрация приповерхностных метеорологических параметров с интервалом в 1 мин. Для метеорологической интерпретации результатов измерений также использовались данные радиозондирования атмосферы на аэрологической станции ЦАО 27713 в г. Долгопрудном, которая находится примерно в 30 км от места установки радиометра «P22M» в г. Фрязино.

Таблица 1. Основные характеристики радиометра-спектрометра «P22M»

Рабочий диапазон частот	18–27.2 ГГц
Разрешение по частоте	200 МГц
Количество каналов	47
Угол места	39°
Флуктуационная чувствительность	0.02 К
Постоянная времени (в каждом канале)	0.3 с
Время получения полного спектра	около 11 с
Угловое разрешение	5-7°

С целью первичной разметки сеансов измерений радиометра по погодным условиям и типам наблюдаемой облачности разработан оригинальный алгоритм анализа связанного видеоряда. Алгоритм⁹ основан на выделении контуров облаков с применением адаптивной фильтрации и определении текстурных признаков отдельного кадра путем расчета матрицы смежности уровня серого (GLCM).

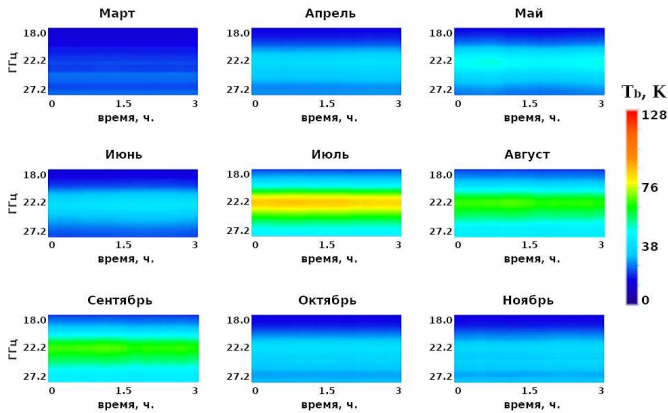


Рис. 5. Характерные сеансы наблюдений для безоблачных условий по месяцам (2021 г.)

В результате первичной разметки было отобрано более 40 сеансов измерений ясного неба, для которых были также получены радиозондовые (р/з) данные об интегральном влагосодержании Q зондируемого столба атмосферы. На рис. 5 приведены спектрограммы яркостной температуры для наиболее характерных сеансов СВЧ-радиометрических

⁹ Egorov D.P., Kutuzova B.G., Akvilonova A.B., Kravchenko O.V. Cloud Species Classification from Video Recordings. // Journal of Physics: Conf. Ser. (JPCS). 2021. Vol. 2127(1). P. 012027.

наблюдений безоблачной атмосферы по месяцам 2021 г. Вариации уровня яркостной температуры здесь обусловлены в основном изменением именно влагосодержания. С использованием р/з данных построена линейная регрессия яркостной температуры на частоте 22.2 ГГц по величине Q . Достоверность по критерию R^2 составила 0.97.

Показано, что разные виды облаков по-разному проявляют себя в поле яркостных температур. Для кучевых облаков поведение яркостной температуры имеет довольно сложный характер (см. рис. 6а), что связано с неравномерным прохождением облаков, а также пространственно-временной изменчивостью поля водосодержания. Кучево-дождевые облака вызывают еще более сложную изменчивость яркостных температур (рис. 6б).

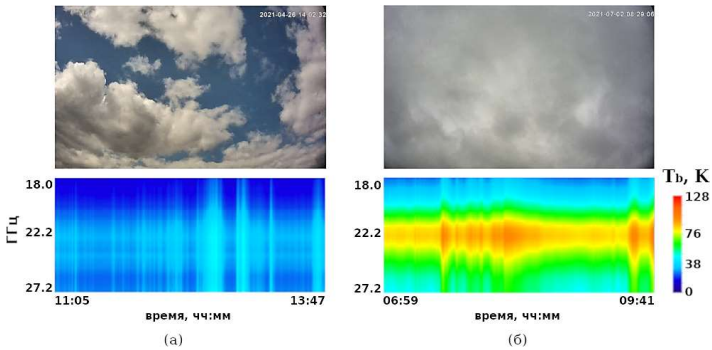


Рис. 6. Влияние облачности на спектр яркостной температуры; (а) Облака Cu hum – сеанс от 26 апреля 2021 г., (б) облака Cb – сеанс от 02 июля 2021 г.

Рассмотрен математический аппарат структурных функций А.Н. Колмогорова, использующийся для статистического описания локально однородной и изотропной турбулентности в средах. В предположении гипотезы о «замороженной» турбулентности Тейлора (скорость сноса отдельных неоднородностей много больше скорости изменения их формы) произведен переход от пространственных интервалов к временным и введен аналог структурной функции для показаний яркостной температуры, наблюдаемой неподвижным наземным радиометром

$$D_{T_b}(v, \tau) = \langle |T_b^y(t + \tau) - T_b^y(t)|^2 \rangle_t, \quad (2)$$

где v – частота излучения, τ – временной интервал, $T_b^y(t)$ – яркостная температура в момент времени t , а D_{T_b} – структурная функция яркостной температуры.

Квадратный корень $S_v(\tau)$ структурной функции (2) обеспечивает естественную меру интенсивности временных флуктуаций излучения. Ключевой особенностью⁶ здесь является то, что $S_v(\tau)$ характеризует интенсивность тех флуктуаций яркостной температуры, периоды которых меньше или сравнимы с τ . Медленные по сравнению с τ изменения яркостной температуры не влияют на разность $T_b^y(t + \tau) - T_b^y(t)$ и поэтому не дают вклада в $S_v(\tau)$.

Дальнейшая разметка данных сеансов СВЧ-радиометрических измерений за 2019-2023 гг. и связанного по времени видеоряда позволила выделить типовые сеансы измерений, на всем протяжении которых сохранялись: 1) безоблачная погода; 2) слабая кучевая разорванная облачность $Cu\ fga$; 3) кучевые облака «хорошей погоды» $Cu\ hum$; 4) облака $Cu\ hum$ за время наблюдений переходили в $Cu\ med$ и обратно; 5) облачность средней степени развития $Cu\ med$; 6) мощные кучевые облака $Cu\ cong$, сильно развитые по вертикали; 7) дождь; 8) снегопад; 9) иные погодные условия. Это помогло получить более ясное представление о влиянии различных погодных условий на характер и интенсивность временных флуктуаций яркостной температуры и поведение ее структурных функций.

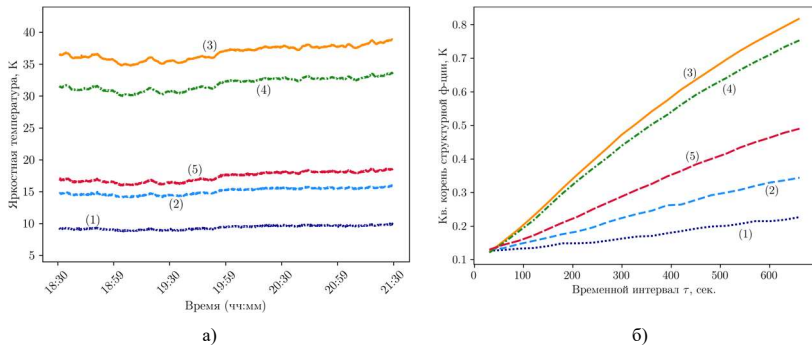


Рис. 7. Сеанс от 23 августа 2019 г., ясное небо: а) временной ход яркостной температуры, б) зависимость интенсивности флуктуаций яркостной температуры $S_v(\tau)$ от временного интервала τ

На рис. 7а изображен временной ход измеренных радиометром и откалиброванных яркостных температур по данным сеанса от 23 августа 2019 г., 18:30–21:30 UTC+3 (безоблачная атмосфера). На всех представленных кривых (1)–(5), соответствующих различным частотным каналам (18.0, 19.4, 22.2, 23.6 и 25.8 ГГц, соответственно), можно видеть достаточно высокую корреляцию измеренных значений. При расчете рис. 7б дополнительно выполнена корректировка значений $S_v(\tau)$ с учетом флуктуаций, полученных при калибровках по черному телу. Из рис. 7б можно видеть, что $S_v(\tau)$ монотонно и прямолинейно возрастает с увеличением временного интервала τ вплоть до значения 600 секунд. Причем с ростом величины τ наклон кривых (1)–(5) практически не изменяется, насыщения не наблюдается. Переходя от временных интервалов обратно к пространственным, в предположении горизонтальной составляющей u_h скорости ветра в тропосфере равной 10 м/с, это говорит о наличии в безоблачной атмосфере крупномасштабных горизонтально-вытянутых неоднородностей – «блинов» размером $u_h \cdot \tau = 6000$ м.

На рис. 8 приведены частотные спектры $S_v(\tau)$ при $\tau = 33, 55, 99, 154$ сек. (кривые 1–4) и, для сравнения, частотный спектр погонного коэффициента поглощения γ_p в водяном паре

приземного слоя (кривая 5). Здесь γ_ρ рассчитан на основе теоретико-эмпирических зависимостей, приведенных в первой главе, и является функцией средних за сеанс температуры воздуха, атмосферного давления и абсолютной влажности, измеренных в приземном слое атмосферы. Как и на рис. 7б, значения $S_\nu(\tau)$ увеличиваются с ростом временного интервала. Для любого τ максимум $S_\nu(\tau)$ наблюдается в диапазоне частот от 22 до 23 ГГц, то есть вблизи резонанса водяного пара. С ростом или падением ν относительно частоты резонансной линии значения $S_\nu(\tau)$ заметно уменьшаются. Можно видеть, что форма спектра $S_\nu(\tau)$ как для интервала $\tau = 154$ сек., так и для других временных интервалов мало отличается от формы частотного спектра погонного коэффициента поглощения в водяном паре γ_ρ .

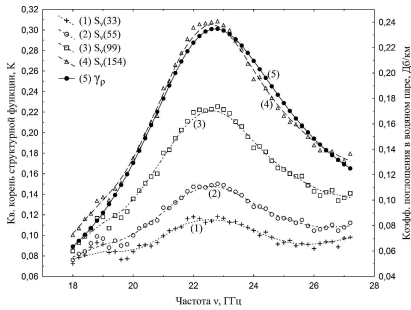


Рис. 8. Спектры интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры $S_\nu(\tau)$ (шкала слева) и спектр погонного коэффициента поглощения в водяном паре γ_ρ (шкала справа). Сеанс от 23 августа 2019 г., ясное небо

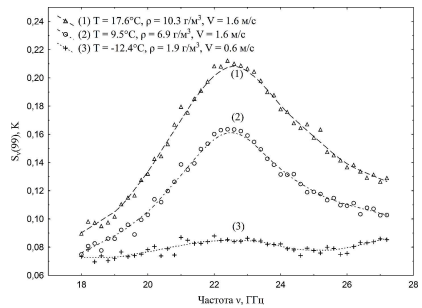


Рис. 9. Флуктуации яркостной температуры на временном интервале 99 сек. в зависимости от частоты ν (ГГц) при различных значениях приповерхностных метеопараметров. Безоблачная атмосфера

На рис. 9 изображены частотные спектры $S_\nu(\tau)$ при $\tau = 99$ сек. для других трех сеансов измерений, выполненных при отсутствии облачности в условиях относительно теплой летней атмосферы (кривая 1), прохладной летней атмосферы (кривая 2) и холодной зимней атмосферы (кривая 3). С уменьшением как температуры воздуха T , так и абсолютной влажности ρ наблюдается заметный спад интенсивности флуктуаций яркостной температуры на всех частотах исследуемого диапазона.

При наличии облачности на интенсивность флуктуаций яркостной температуры оказывает влияние не только водяной пар, но и содержание в облаках воды в ее жидкокапельной фазе. В случае слабых, неразвитых по вертикали облаков *Сu fra* интенсивность флуктуаций яркостной температуры увеличивается, но незначительно. Из-за этого структурные функции принимают немногим более высокие значения, но ведут себя в целом так же, как и в случае безоблачной погоды. Поэтому наибольший интерес здесь представляют кучевые облака вертикального развития, начиная с *Сu hum* и заканчивая *Сu cong* и *Сb*, в которых присутствуют мощные потоки воздушных масс. На рис. 10а изображен

временной ход яркостных температур по данным сеанса от 03 августа 2019 г., 12:00–15:00 UTC+3, кучевые облака Cu hum (переходят в Cu med в 14:45). Зависимость $S_\nu(\tau)$ от временного интервала τ приведена на рис. 10б. Кривые (1)-(5) соответствуют частотным каналам (1) 18.0, (2) 19.4, (3) 22.2, (4) 23.6 и (5) 25.8 ГГц.

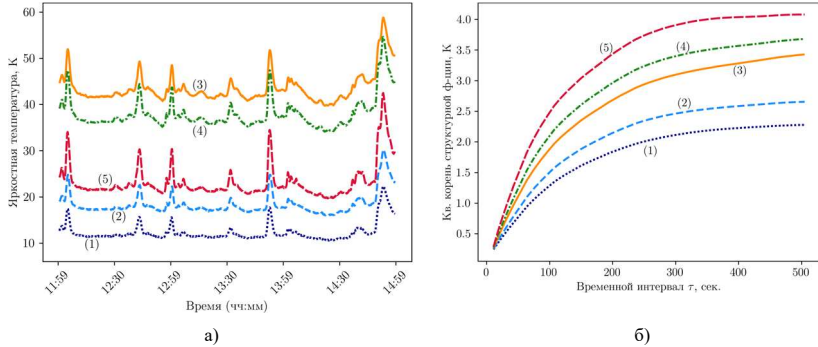


Рис. 10. Сеанс от 03 августа 2019 г., Cu hum/med: а) временной ход яркостной температуры, б) зависимость интенсивности флуктуаций яркостной температуры $S_\nu(\tau)$ от временного интервала τ

Уже в случае облаков «хорошей погоды» Cu hum поглощение и уровень яркостной температуры за счет жидких капель заметно возрастают. Характер кривых $S_\nu(\tau)$ как в зависимости от временного интервала τ , так и от частоты ν существенно отличается от случая ясного неба; интенсивность флуктуаций яркостной температуры растет. При этом вклад облаков увеличивается с ростом частоты, что приводит к смещению максимума $S_\nu(\tau)$ в сторону более высокой частоты 27.2 ГГц. В то же время на рис. 10а максимальное значение яркостной температуры сохраняется в канале 22.2 ГГц. Дальнейший анализ случаев облачности Cu med и Cu cong показал, что смещение максимума самой яркостной температуры в сторону наибольшей частоты с ростом водозапаса и вертикальной протяженности облаков происходит несколько позже, чем для ее структурной функции. На рис. 10б кривые показывают быстрый рост до величины $\tau \sim 50$ –75 сек., но в дальнейшем при $\tau \sim 100$ –250 сек. рост существенно замедляется. Принимая гипотезу Тейлора и горизонтальную составляющую скорости ветра в тропосфере равной 10 м/с, имеем неоднородности размером 1–2.5 км, что соответствует горизонтальной протяженности кучевых облаков типа Cu hum/med.

Решена задача автоматического разбиения сеансов СВЧ-радиометрических измерений по категориям (типам) наблюдаемой облачности путем анализа частотных спектров структурной функции яркостной температуры на фиксированных временных интервалах. Для решения задачи выбран алгоритм иерархической (агломеративной) кластеризации, использующий метод Уорда для оценки расстояний между кластерами. На рис. 11 приведены результаты применения алгоритма к летним сеансам 2018–2020 гг., среди которых вручную

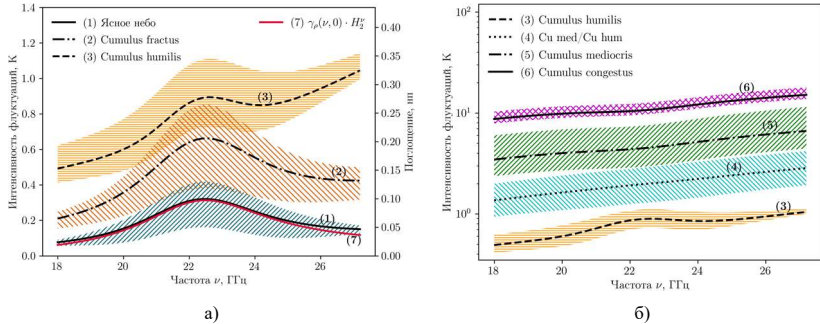


Рис. 11. Летняя атмосфера, 2018-2020 гг. Частотные спектры $S_V(\tau)$ при $\tau = 99$ сек. (шкала слева) и модель частотного спектра полного поглощения в водяном паре (красная кривая) для стандартной атмосферы (шкала справа). Черные кривые отражают среднюю интенсивность временных флуктуаций яркостной температуры при указанных условиях. Закрашенные области показывают разброс между минимальной и максимальной интенсивностью временных флуктуаций при указанных условиях; а) условия (1)-(3), б) условия (3)-(6)

были исключены все, кроме тех, на всем протяжении которых наблюдалась безоблачная атмосфера, либо на фоне ясного неба сохранялась кучевая облачность.

В третьей главе рассматриваются двухчастотный и разработанный «многочастотный» методы решения обратной задачи СВЧ-радиометрического восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы в заданной подспутниковой точке (без учета размеров элемента разрешения антенны СВЧ радиометра). Для К-диапазона проведен теоретический расчет максимальных погрешностей определения полной массы водяного пара (влагосодержания) Q и водозапаса облаков (водосодержания) W как косвенных величин в зависимости от ошибки измерения уровня яркостной температуры ΔT_b , а также ошибок, допущенных при оценке значений таких модельных параметров как средняя абсолютная температура атмосферы T_{av} и эффективная температура слоя облачности t_w .

При изменении погодных условий в сторону увеличения средних значений \bar{Q} и \bar{W} , а, следовательно, и полного поглощения $\gamma_*(\nu)$, наблюдается рост максимальных погрешностей ΔQ и ΔW . При этом наибольший вклад в $\Delta Q/Q$ и $\Delta W/W$ вносит именно ΔT_b , тогда как ошибки в модельных параметрах начинают оказывать заметное влияние лишь при $\Delta T_{av} > \pm 10^\circ\text{C}$ и $t_w > \pm 5^\circ\text{C}$.

По данным проведенных измерений яркостной температуры нисходящего излучения восстановлена динамика значений интегральных параметров влаго- и водосодержания. Ниже представлены результаты расчета значений Q (рис. 12а) и W (рис. 12б) двухчастотным СВЧ-радиометрическим методом для сеанса измерений от 1-го августа 2017 года, 05:10–07:10 UTC+3, безоблачная погода сменяется развитой облачностью. Параметр t_w принят равным -2°C . Величины погрешностей приведены из расчета, что ошибка определения T_b^\downarrow составляет 1 К, а ошибка ΔT_{av} составляет 3°C .

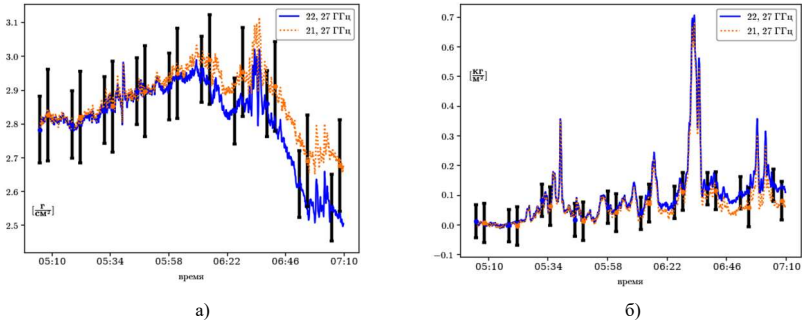


Рис. 12. Двухчастотный метод, безоблачная погода сменяется развитой облачностью; сплошная линия – $\nu_1 = 22$ ГГц, $\nu_2 = 27$ ГГц, пунктирная линия – $\nu_1 = 21$ ГГц, $\nu_2 = 27$ ГГц; а) влагосодержание Q , б) водозапас W .

С использованием независимых данных около полутора тысяч сеансов р/з измерений, проведенных за 2018–2022 гг. в г. Долгопрудном, путем решения сначала прямой (в предположении нулевого водозаписа), а затем обратной задачи, исследуется методическая ошибка СВЧ-радиометрического восстановления Q , связанная с неточным знанием высотных распределений температуры, давления и влажности воздуха (в ходе решения обратной задачи). Показано¹⁰, что рассмотренные методы оказываются довольно устойчивыми к естественной высотной изменчивости профилей температуры, давления и влажности воздуха и к их отклонениям от соответствующих стандартных распределений.

В четвертой главе исследуются систематические ошибки восстановления влаго- и водосодержания (Q и W) двухчастотным СВЧ-радиометрическим методом, возникающие из-за неучета пространственного распределения облаков в элементе разрешения антенны спутникового СВЧ радиометра и вызванные нелинейностью взаимосвязи уровня яркостной температуры с водностью облака. Рассмотрена основанная на результатах обработки данных стереоскопической аэрофотосъемки над обширными территориями и акваториями статистическая модель В.Г. Планка¹¹ для разрывной кучевой облачности. В этой модели количественное распределение облаков по их эквивалентным (эффективным) диаметрам описывается соотношением

$$N(D) = K \cdot e^{-\alpha D}, \quad D_{\min} < D < D_{\max}, \quad (3)$$

¹⁰ Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Аквилонова А.Б. О методических ошибках восстановления полной массы водяного пара по нисходящему радиоизлучению облачной атмосферы // Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». МИ ВлГУ, Муром. 2022. С. 561-570.

¹¹ Plank V.G. Distribution of Cumulus Clouds in Representative Florida Populations // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1969. Vol. 8. N. 1. P. 46-67.

где D – эквивалентный диаметр облака (км), N – количество облаков с диаметрами в интервале от D до $D + dD$ (км⁻¹), D_{\min} и D_{\max} – минимальный и максимальный диаметры облаков в ансамбле (км), K – нормировочный коэффициент (км⁻¹), α – параметр, зависящий от времени суток и различных локальных климатических условий (км⁻¹).

Более того, параметризована взаимосвязь между диаметром облака D и его мощностью (вертикальной протяженностью) H

$$H = \eta \cdot D \cdot \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{\beta}, \quad (4)$$

где η и β – безразмерные параметры, зависящие от текущих погодных условий.

В совокупности с другими модельными параметрами, η , β , α и K в сущности определяют «характер» пространственного распределения облаков в некоторой области атмосферы. Приведены конкретные числовые значения указанных параметров для 12-ти наиболее типовых случаев кучевой облачности («Т1»–«Т9», «L1»–«L3»).

Для моделирования пространственных полей яркостной температуры разрывной облачности (см. рис. 13) задана трехмерная расчетная область с сеткой 300×300×100 узлов, имитирующая область атмосферы площадью 50×50 км и высотой 20 км, соответственно. Форма облаков считается цилиндрической. Положение облака задается координатами центра его нижнего основания (x_c, y_c, z_c), при этом x_c и y_c выбираются случайно и таким образом, чтобы основания цилиндров не имели пересечений, а z_c соответствует некоторой постоянной высоте нижней кромки облаков (1.219 км для случая «L2»). Высотный профиль водности внутри отдельного облака аппроксимируется согласно модели Мазина (1) с учетом полученной регрессионной зависимости водозапаса W от мощности H . Вне облаков водность равна нулю.

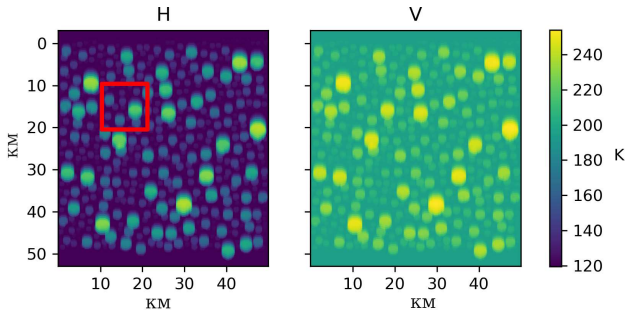


Рис. 13 Яркостная температура уходящего в направлении зенитного угла $\theta = 51^\circ$ излучения рассматриваемой области атмосферы с гладкой водной поверхностью при температуре 15°C в качестве подстилающей, стандартными высотными профилями температуры, давления, влажности и добавленной облачностью типа «L2». Частота 36 ГГц, (H) – горизонтальная поляризация, (V) – вертикальная

Красным квадратом на рис. 13 изображен элемент разрешения $\Omega^{n \times n}$ размером $n \times n = 10 \times 10$ км. Поскольку ДНА радиометра обладает относительно широким главным лепестком, в первом приближении можно принять, что $\Omega^{n \times n}$ – обычное окно усреднения.

Для всех рассмотренных 3D реализаций облачных полей при зондировании в надир ($\theta = 0$) вне зависимости от положения $\Omega^{n \times n}$ средняя в элементе разрешения яркостная температура разрывной облачности меньше либо равна яркостной температуре эквивалентного по водозапасу горизонтально-однородного облачного слоя в $\Omega^{n \times n}$. Показано, что в К- и Ка-диапазонах при облачности умеренного и сильного вертикального развития (например, «L2») такое различие становится существенным и может достигать 10 К. В этих случаях приближение поля разрывной и неоднородной кучевой облачности горизонтально-однородными слоями будет приводить к большим ошибкам при решении обратных задач.

Таким образом, элемент разрешения вводится через операцию свертки с ядром $\Omega^{n \times n}$ исходного массива яркостных температур, которые рассчитываются в каждой подспутниковой точке моделируемой области аналогично рис. 13. Причем в любой точке и при любом положении ℓ окна $\Omega^{n \times n}$ заранее известны истинные величины влаго- и водозапаса. Проведен сравнительный анализ средних по всем ℓ ошибок восстановления интегрального водозапаса $\Delta W_I^{\text{CP}} = \langle W_{\text{ист}}^\ell - W_I^\ell \rangle_\ell$ и $\Delta W_{II}^{\text{CP}} = \langle W_{\text{ист}}^\ell - W_{II}^\ell \rangle_\ell$, где W_I^ℓ получаются в результате последовательного решения прямой задачи расчета массивов яркостных температур для частот $\nu_1 = 22.2$ ГГц и $\nu_2 = 27.2 / 36 / 89$ ГГц, $\theta = 0$, обратной задачи восстановления интегральных параметров двухчастотным методом в каждой подспутниковой точке (300×300 узлов) и свертке полученного массива значений водозапаса с окном усреднения $\Omega^{n \times n}$. В случае W_{II}^ℓ операции меняют порядок следования: сначала производится свертка соответствующих массивов яркостных температур с $\Omega^{n \times n}$, а затем решение обратной задачи. Такой порядок операций в большей степени соответствует реальному положению вещей при ДЗЗ/ДЗА. Необходимо отметить, что как ΔW_I^{CP} , так и $\Delta W_{II}^{\text{CP}}$ отражают ошибки двухчастотного метода при восстановлении среднего по области $n \times n$ водосодержания, однако, $\Delta W_{II}^{\text{CP}}$ содержит дополнительную величину ошибки, обусловленную систематической потерей информации о пространственной структуре облачности вследствие усреднения поля яркостной температуры в элементе разрешения (в отличие от ΔW_I^{CP}). Аналогичным образом сравниваются ΔQ_I^{CP} и $\Delta Q_{II}^{\text{CP}}$.

С целью охвата как можно большего разнообразия возможных вариантов распределения облачности при сравнительном анализе ошибок (I) и (II) в каждом из случаев «Т1»–«Т9» и «L1»–«L3» параметр η варьировался в пределах от 0.53 до 1.3 с шагом 0.1, параметр β менялся в интервале от -0.44 до 0.54 с шагом 0.1, а доля покрытого облаками неба p задавалась в границах от 0.2 до 0.6 с шагом 0.02. На рис. 14 для элемента разрешения 10×10 км (60×60 узлов) представлены рассчитанные ΔW_I^{CP} (кривая 1) и $\Delta W_{II}^{\text{CP}}$ (кривая 2) в зависимости от истинного водозапаса $W_{\text{ист}}^{\text{CP}} = \langle W_{\text{ист}}^\ell \rangle_\ell$. Кривые (1) и (2) получены в результате линейной интерполяции имеющегося набора точек и последующего сглаживания. Рассмотрена комбинация частотных каналов 22.2 и 36 ГГц. В качестве подстилающей рассмотрена гладкая

водная поверхность при температуре 15°C. Высотные распределения температуры, давления и влажности соответствуют модели стандартной атмосферы МСЭ. Профиль водности аппроксимируется согласно (1). Эффективная температура облаков в ходе решения обратной задачи принята равной $t_w = 0^\circ\text{C}$. Расчеты проведены с использованием технологии неспециализированных вычислений на графических процессорах (GPU). Маркерами синего цвета обозначены величины $\Delta W_{\text{II}}^{\text{CP}}$ для оригинальных типовых случаев (см. расшифровку в правой части рисунка). Маркерами красного цвета обозначены $\Delta W_{\text{II}}^{\text{CP}}$ для тех же 12-ти случаев, но исходное табличное значение η заменено на 1.33. Зеленый цвет – исходное значение p заменено на 0.67 (67% покрытия).

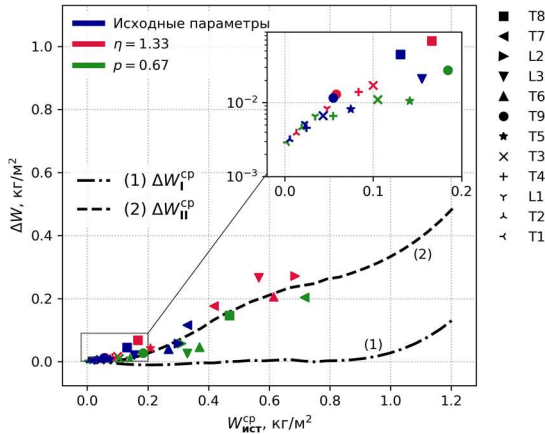


Рис. 14. Зависимость ошибок $\Delta W_{\text{I}}^{\text{CP}}$ и $\Delta W_{\text{II}}^{\text{CP}}$ от величины истинного водозапаса $W_{\text{ист}}^{\text{CP}}$

Отдельно рассмотрены зависимости $\Delta Q_{\text{II}}^{\ell}$ и $\Delta W_{\text{II}}^{\ell}$ от параметра η . Показано, что с увеличением η , т.е., по существу, с ростом вертикальной протяженности облаков (см. (4)), растут как средние, так и максимальные по модулю ошибки восстановления интегральных параметров. Во всех случаях имеет место занижение W_{II}^{ℓ} и завышение Q_{II}^{ℓ} относительно их истинных значений $W_{\text{ист}}^{\ell}$ и $Q_{\text{ист}}^{\ell}$, соответственно.

Исследуется влияние размеров элемента разрешения $n \times n$. Показано, что при $n > 10$ км имеет место «насыщение» ошибок $\Delta Q_{\text{II}}^{\ell}$ и $\Delta W_{\text{II}}^{\ell}$. Также обнаружено, что вне зависимости от n завышенная оценка на t_w приводит к завышению восстанавливаемой величины среднего по элементу разрешения водозапаса. Поскольку использование приближения однородного сплошного слоя или горизонтально-однородной плоскостной модели, напротив, приводит к ее систематическому занижению, эти два эффекта могут частично или полностью компенсировать друг друга, что требует отдельного рассмотрения.

Установлено, что достаточно сильное влияние на ошибки в интегральных параметрах оказывает также выбор комбинации частотных каналов.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают, что в среднем неучет характера пространственного распределения облаков в элементе разрешения спутникового СВЧ радиометра от 10×10 км и при использовании комбинации частотных каналов 22.2 и 36 ГГц приводит к относительным ошибкам восстановления интегрального водозапаса $>15\%$ и полной массы водяного пара $<-10\%$ на уровне атмосферного поглощения лишь 0.15 нп во втором канале. Если бы элемент разрешения имел размеры 1×1 км, относительные ошибки в среднем не превышали бы по модулю величины $\sim 5\%$.

Полученные оценки свидетельствуют о необходимости учета пространственной структуры облачности при обработке спутниковых микроволновых данных. Дополнительные количественные и качественные данные об облаках при этом могут быть получены с помощью совместных (и согласованных) спутниковых измерений в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах¹². По оптическим приборам наблюдается верхний слой облачности, определяется ее маска и фазовый состав, высота и температура. Введение этих и других данных в имеющиеся расчетные модели могло бы значительно повысить точность СВЧ-радиометрического восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией:

1. В процессе проведения 4-х летнего цикла непрерывных наблюдений получены новые данные, позволившие проследить для Московской области сезонную изменчивость яркостной температуры (18-27.2 ГГц) нисходящего излучения атмосферы и ее влагосодержания.
2. Установлено, что в условиях отсутствия облачности или при наличии кучевых облаков слабого вертикального развития Cu fr частотный спектр интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры (квадратного корня ее структурной функции) подобен частотному спектру коэффициента поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы в К-диапазоне.
3. Для условий ясной погоды обнаружен монотонный рост интенсивности флуктуаций яркостной температуры с увеличением временного интервала до 600 секунд и более (без насыщения), что свидетельствует о наличии в безоблачной атмосфере

¹² Данилычев М.В., Егоров Д.П., Кутуза И.Б., Кутуза Б.Г. Учет данных спутникового зондирования в ИК-диапазоне при выборе СВЧ-модели облачной атмосферы // Физические основы приборостроения. 2022. Т. 11. № 3 (45). С. 84-91.

крупномасштабных горизонтально-вытянутых неоднородностей размером 6 км и более.

4. Показано, что при появлении кучевых облаков умеренного (Cu med) и сильного (Cu cong) вертикального развития структурные функции яркостной температуры как в зависимости от временного интервала, так и от частоты существенно отличаются от случая ясного неба. С ростом водозапаса облака наблюдается значительное увеличение интенсивности флуктуаций яркостной температуры, причем вклад облаков увеличивается с ростом частоты.
5. Показано, что для случая кучевой облачности наблюдается сначала быстрый рост интенсивности флуктуаций яркостной температуры до величины временного интервала в среднем 75-100 секунд, а затем существенное замедление роста при величине 200-300 секунд (что соответствует средней протяженности кучевых облаков по горизонтали).
6. Разработан алгоритм автоматической классификации сеансов СВЧ-радиометрических измерений по типу наблюдаемой облачности путем анализа частотных спектров структурной функции яркостной температуры на фиксированных временных интервалах.
7. Предложен новый подход к исследованию систематических ошибок восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы СВЧ-радиометрическим методом, возникающих за счет использования при решении обратной задачи однородной или горизонтально-однородной (плоскослойной) моделей облачности, которые игнорируют особенности пространственного распределения реальных облачных полей.
8. Разработана и программно реализована методика расчета радиационных характеристик пространственно неоднородных облачных полей в 3D с использованием программно-аппаратной архитектуры CUDA.
9. Впервые рассмотрено влияние параметров облаков, характеризующих их пространственное распределение (согласно модели Планка), на ошибки восстановления влаго- и водосодержания по усредненному в элементе разрешения спутникового СВЧ-радиометра радиотепловому излучению. Показано, что неучет характера пространственного распределения облаков в элементе разрешения размером от 10x10 км может приводить к относительным ошибкам более 10-15% в восстановленных значениях интегральных параметров.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Результаты измерений флуктуаций радиоизлучения атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара вблизи 22.235 МГц // *Нелинейный мир*. 2018. Т. 16. № 2. С. 69-71.
2. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Пространственно-временная структура яркостной температуры атмосферы в К-диапазоне при наличии кучевой облачности // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2021. № S680. С. 236-241.
3. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Влияние кучевой облачности на флуктуации нисходящего микроволнового излучения атмосферы в области резонанса водяного пара 18-27 ГГц // *Нелинейный мир*. 2021. Т. 19. № 2. С. 5-9.
4. Егоров Д.П., Илюшин Я.А., Кутуза Б.Г. Сверхвысокочастотное радиометрическое зондирование кучевой облачности при наблюдении из космоса // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2021. Т. 64. № 8-9. С. 625-634.
5. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Влияние водяного пара и кучевой облачности на флуктуации яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы в К-диапазоне // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2021. Т. 64. № 8-9. С. 712-721.
6. Данилычев М.В., Егоров Д.П., Кутуза И.Б., Кутуза Б.Г. Учет данных спутникового зондирования в ИК-диапазоне при выборе СВЧ-модели облачной атмосферы // *Физические основы приборостроения*. 2022. Т. 11. № 3 (45). С. 84-91.
7. Аквилонова А.Б., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. Изучение характеристик облачной атмосферы по результатам измерений спектров ее нисходящего СВЧ-излучения в области резонансного поглощения водяного пара 18,0-27,2 ГГц // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 12. С. 66-77.
8. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Илюшин Я.А. Учет пространственной структуры облачности при СВЧ-радиометрическом восстановлении интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы // *Физические основы приборостроения*. 2023. Т. 12. № 1 (47). С. 10-23.

Публикации в изданиях, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и/или Scopus:

9. Egorov D.P., Kutuz B.G. Atmospheric Brightness Temperature Fluctuations in the Resonance Absorption Band of Water Vapor 18–27.2 GHz. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021. Vol. 59. Issue 9. P. 7627-7634.
10. Egorov D.P., Kutuz B.G. The Influence of Water Vapor and Cumulus Clouds on the Brightness-Temperature Fluctuations in the Downwelling K-Band Radiation of the Atmosphere. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2021. Vol. 64. No. 8-9. P. 641-649.
11. Egorov D.P., Kutuz B.G., Ilyushin Y.A. Microwave Radiometric Sensing of Cumulus Cloudiness from Space. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2021. Vol. 64. No. 8-9. P. 564-572.

12. Egorov D.P., Kutuza B.G. The Influence of Clouds on Atmospheric Radiation Fluctuations in the Resonance Absorption Band of Water Vapor 18–27.2 GHz. // *Journal of Physics: Conf. Ser. (JPCS)*. 2020. Vol. 1632(1). P. 012010.
13. Egorov D.P., Ilyushin Ya.A., Koptsov Ya.V., Kutuza B.G. Simulation of Microwave Spatial Field of Atmospheric Brightness Temperature Under Discontinuous Cumulus Cloudiness. // *Journal of Physics: Conf. Ser. (JPCS)*. 2021. Vol. 1991(1). P. 012015.
14. Egorov D.P., Kutuza B.G., Akvilonova A.B., Kravchenko O.V. Cloud Species Classification from Video Recordings. // *Journal of Physics: Conf. Ser. (JPCS)*. 2021. Vol. 2127(1). P. 012027.
15. Koptsov Y., Ilyushin Y., Kutuza B., Egorov D. Microwave Radiometric Mapping of Broken Cumulus Cloud Fields from Space: Numerical Simulations // *Lecture Notes in Computer Science*. 2022. LNCS 13708. P. 185-198.
16. Akvilonova A.B., Egorov D.P., Kutuza B.G., Smirnov M.T. Studying Characteristics of the Cloudy Atmosphere Based on Measuring its Downwelling Microwave Radiation Spectra in the 18.0–27.2 GHz Water Vapor Resonant Absorption Band. // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. Vol. 47(12). P. 953-961.
17. Cheremisin G., Egorov D., Kravchenko O., Dev A. Deep Convolutional Neural Network for Reconstructing the Cloud Phase Distribution from Level-1b MODIS Data // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2819. P. 030005.
18. Egorov D.P., Kutuza B.G., Smirnov M.T. Web Portal for a Databank of Microwave Radiometric Measurements of the Atmosphere in Resonant Band of Water Vapor 18–27 GHz // *Proceedings of 2019 PhotonIcs and Electromagnetics Research Symposium*. P. 3421-3427.
19. Egorov D.P., Ilyushin Ya.A., Kutuza B.G., Koptsov Ya.V. Cloud Liquid Content Retrieval Errors Related to the Flat-layered Cloudfield Model Usage // *Proceedings of 2021 PhotonIcs and Electromagnetics Research Symposium*. P. 1978-1984.
20. Egorov D.P., Kutuza B.G. Spatio-temporal Fluctuations in Downwelling K-band Radiation of Atmosphere in the Presence of Clouds // *Proceedings of 2022 PhotonIcs and Electromagnetics Research Symposium*. P. 1014-1017.
21. Danilychev M.V., Egorov D.P., Kutuza B.G., Kutuza I.B. A Note on Joint Satellite Measurements of Cloudy Atmosphere in Microwave and Infrared Ranges // *Proceedings of IEEE 8th All-Russian Microwave Conference, RMC*. 2022. P. 370-375.

Публикации в изданиях, входящих в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), и в трудах конференций:

22. Илюшин Я.А., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Копцов Я.В. СВЧ-радиометрическое картирование разорванной кучевой облачности с космического аппарата // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. 2022. № 4. С. 329-330.
23. Кутуза Б.Г., Егоров Д.П., Казарян Р.А. Влияние водяного пара и облачности на флуктуации радиоизлучения атмосферы в частотном диапазоне 18-27 ГГц // *Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь»*. ИРЭ РАН, Москва. 2017. С. 203-206.

24. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Измерение временных флуктуаций яркостной температуры в резонансной области поглощения водяного пара 18-27 ГГц // Материалы II Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». МИ ВлГУ, Муром. 2018. С. 239-245.
25. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Разработка программного обеспечения для обработки результатов измерений яркостной температуры атмосферы и её пространственно-временных флуктуаций в резонансной области водяного пара вблизи $\lambda = 1.35$ см с помощью спектрального СВЧ-радиометра // Материалы конференции «Цивилизация знаний». АНО ВО РосНОУ, Москва. 2018. С. 694-702.
26. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. Веб-портал банка данных СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы в диапазоне резонансного поглощения водяного пара 18 – 27 ГГц // Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». МИ ВлГУ, Муром. 2019. С. 245-254.
27. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. О точности определения влагосодержания при СВЧ-радиометрическом зондировании атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара 18-27 ГГц // Материалы XXVI Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ-26). КФУ, Казань. 2019. С. 254-257.
28. Кутуза Б.Г., Егоров Д.П. Флуктуации яркостной температуры атмосферы в резонансной области водяного пара 18 - 27.2 ГГц // Материалы XIII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН, Москва. 2019. С. 251-256.
29. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Влияние облаков на флуктуации радиоизлучения атмосферы в резонансной области водяного пара 18 – 27 ГГц // Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». МИ ВлГУ, Муром. 2020. С. 231-237.
30. Егоров Д.П. Многочастотные измерения радиоизлучения атмосферы в резонансной области водяного пара 18-27 ГГц и возможности восстановления интегральных параметров влагосодержания // Сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН, Москва. 2020. С. 233-236.
31. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Влияние кучевой облачности на флуктуации нисходящего радиоизлучения атмосферы в К-диапазоне // Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». БФУ, Калининград. 2021. С. 688-693.
32. Илюшин Я.А., Кутуза Б.Г., Егоров Д.П., Копцов Я.В. Численное моделирование радиояркостных температур разорванных облачных полей в микроволновом диапазоне // Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». БФУ, Калининград. 2021. С. 699-703.

33. Егоров Д.П., Илюшин Я.А., Копцов Я.В., Кутуза Б.Г. Моделирование микроволнового пространственного поля яркостной температуры атмосферы при разрывной кучевой облачности // *Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»*. МИ ВлГУ, Муром. 2021. С. 222-229.
34. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Аквилонова А.Б. О методических ошибках восстановления полной массы водяного пара по нисходящему радиоизлучению облачной атмосферы // *Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»*. МИ ВлГУ, Муром. 2022. С. 561-570.
35. Егоров Д.П., Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Кутуза И.Б. Учет результатов спутникового ИК-зондирования при выборе СВЧ-модели облачной атмосферы // *Сборник трудов XV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь»*. ИРЭ РАН, Москва. 2022. С. 158-163.
36. Кутуза И.Б., Данилычев М.В., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Кравченко О.В. Восстановление параметров атмосферы по данным совместных измерений в СВЧ и ИК диапазонах // *Материалы 15-ой Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации»*. 2022. С 21-22.
37. Аквилонова А.Б., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т., Кузнецов О.О. Сопоставление СВЧ-радиометрических измерений нисходящего излучения атмосферы в диапазоне 18-27,2 ГГц с модельными расчетами по радиозондам // *Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 10.
38. Егоров Д.П., Верина Я.В., Кравченко О.В. Разработка нейросетевого метода восстановления влажностного профиля атмосферы по данным наземного микроволнового радиометра-спектрометра // *Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 147.
39. Егоров Д.П., Кутуза Б.Г. Пространственные характеристики облаков по результатам измерений спектра нисходящего излучения атмосферы в К-диапазоне // *Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 148.