

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Горбунова Михаила Евгеньевича

на диссертационную работу Егорова Доброслава Павловича

«Пространственные неоднородности атмосферы и учет их влияния при СВЧ-радиометрическом зондировании Земли из космоса»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертационная работа Егорова Д.П. посвящена радиометрическим исследованиям пространственных неоднородностей атмосферы и их влиянию на точность определения влаго- и водосодержания при радиометрическом зондировании атмосферы и подстилающей поверхности из космоса.

Целью диссертационной работы являлось определение статистических характеристик неоднородностей радиоизлучения атмосферы, а также исследование влияния характера пространственного распределения облаков на точность решения обратных задач при радиометрическом зондировании Земли из космоса.

Актуальность диссертационной работы обусловлена исключительной важностью радиометрического зондирования нисходящего излучения атмосферы и уходящего излучения системы атмосфера – подстилающая поверхность для определения полной массы водяного пара, водозапаса и температуры облаков, профилей температуры и влажности атмосферы, концентраций малых газовых составляющих, осадков.

Диссертационная работа представлена на 114 страницах машинописного текста и содержит 37 рисунков и 10 таблиц. Список литературы состоит из 91 наименования, включая 4 публикации диссертанта. Основные результаты по теме диссертации изложены в 39 публикациях, 8 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 12 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Диссертация состоит из введения, четырех глав, содержащих материал, выносимый на защиту, заключения, содержащего основные результаты и выводы, и списка цитируемых источников.

Во введении подробно излагаются цели и задачи диссертационной работы и обосновывается их актуальность.

Первая глава носит вводный характер. В ней рассмотрено влияние вертикальной неоднородности облачной атмосферы на ее радиоизлучение. Интенсивность радиоизлучения характеризуется яркостной температурой, которая в свою очередь является функцией профиля термодинамической температуры и коэффициента ослабления. При зондировании под ненулевым зенитным углом вводятся дополнительные приближения для интегрального ослабления с учетом рефракции. Это позволяет получить выражения для яркостных температур нисходящего и восходящего микроволнового излучения, учитывающих космическое излучение и рассеяние на подстилающей поверхности. В безоблачной атмосфере основной вклад в микроволновое излучение дают вращательные молекул атмосферных газов, важнейшими из которых являются водяной пар и молекулярный кислород. Пример весовых функций для водяного пара в диапазоне частот вблизи линии 22.235 ГГц показывает, что высота их максимума растет с понижением частоты. При этом ширина максимума составляет около 20 км. Поглощение в облаках в миллиметровом диапазоне хорошо описывается в рэлеевском приближении с привлечением эмпирических зависимостей параметров комплексной диэлектрической проницаемости воды от температуры.

Введенные модели и приближения позволяют выполнять расчет яркостной температуры нисходящего или восходящего излучения в заданной точке при заданном зенитном угле по заданным профилям термодинамической температуры, давления, абсолютной влажности (парциальной плотности водяного пара) и влажности.

Вторая глава посвящена описанию результатов экспериментальных исследований пространственно-временной изменчивости нисходящего излучения атмосферы. Измерения были выполнены при помощи радиометра-спектрометра R22m, разработанного в СКБ ИРЭ им. В.А. Котельникова. Измерения проводились в диапазоне 18–27.2 ГГц в 47 каналах с разрешением 200 МГц. В дополнение к этому, выполнялась видеофиксация погодных условий и регистрация приповерхностных температуры, давления, абсолютной влажности, скорости ветра и величину осадков. Был разработан алгоритм анализа видеозаписей с целью автоматизированной классификации погодных условий и типа облачности. Также использовались данные радиозондов, запускаемых на станции ЦАО в г. Долгопрудном на расстоянии около 30 км от места радиометрических наблюдений. Для калибровки использовалась методика двух эталонов в двух вариантах. В первом случае использовались горячий эталон при комнатной температуре и холодный эталон при температуре кипения жидкого азота. Во втором случае холодный эталон заменялся яркостной температурой модельной безоблачной атмосферы. Как следует из формулы (2.2), вторая схема основана на предположении о том, что модель дает истинную яркостную температуру. Поэтому ее применение, хотя и приводит к увеличению ошибок, однако оправданно для повторной калибровка радиометра при отсутствии жидкого азота. Сезонная изменчивость исследовалась на материале отобранных 40 сеансов наблюдений в условиях ясного неба, для которых имелись независимые радиозондовые измерения интегрального влагосодержания. Коэффициент детерминации для зависимости наблюдаемой яркостной температуры от интегрального влагосодержания составил около 0.97, что говорит о сильной степени зависимости. Как показывает рисунок 2.4, зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией. Наличие облачности усложняет интерпретацию яркостной температуры, которая в этом случае связана со сложной пространственно-временной структурой распределения мелкокапельной воды, и существенно зависит от типа облачности.

Для анализа временных зависимостей измеренной яркостной температуры диссертант применяет аппарат структурных функций А.Н. Колмогорова и гипотеза замороженности Тейлора. Техника структурных функций является более общей по сравнению с техникой корреляционных функций и применима к ряду нестационарных случайных процессов. Структурная функция может быть выражена через двумерный спектр флуктуаций полного поглощения, а последний можно вычислить в рамках метода плавных возмущений из двумерного спектра флуктуаций абсолютной влажности. В частности, для колмогоровской турбулентности структурная функция полного поглощения подчиняется закону $5/3$. Из всех сеансов наблюдений за 2019–2023 год были выделены типовые сеансы, на протяжении которых не менялись условия, начиная от безоблачной погоды, и включая разные типы облачности и осадков. Для безоблачной погоды величина структурной функции на разных частотах определяется их отклонением от резонансной частоты линии 22.235 ГГц. В этом случае наблюдается монотонный рост структурных функций без насыщения вплоть до временного интервала 600 сек. Если предположить, что средняя скорость ветра в тропосфере составляет 10 м/с, то это соответствует горизонтальному масштабу 6 км. Фактически, как отмечено диссертантом, такой характер структурных функций, аппроксимируемых степенными зависимостями на больших временных интер-

валах, подтверждает присутствие в атмосфере сильно анизотропных неоднородностей. Форма частотной зависимости корня из структурной функции очень близка к форме частотного спектра погонного коэффициента поглощения. Уменьшение приповерхностной температуры воздуха и абсолютной влажности приводит к снижению интенсивности флуктуаций яркостной температуры на всех частотах исследуемого диапазона. Соответствующие зависимости описываются при помощи линейной регрессии, однако разброс оказывается заметным, поскольку существует также зависимость от вертикальных профилей этих метеопараметров. Анализ наблюдений в условиях облачности существенно более сложен. Анализ структурных функций позволяет оценить характерный горизонтальный размер облаков величиной 0.5–1 км. Спектральные зависимости структурных функций при фиксированном временном интервале позволяют классифицировать типы облачности с применением методов кластерного анализа.

В третьей главе рассмотрено восстановление полной массы водяного пара и водозапаса облаков по измерениям яркостной температуры нисходящего излучения. Стандартным является двухчастотный метод. В диссертации приводятся оценки его погрешностей. Вычислен определитель системы двух уравнений метода, позволяющий оптимизировать пару частот. Как показано в диссертации, двухчастотный метод применим также для зондирования на орбите по уходящему излучению. Многочастотный метод является естественным обобщением двухчастотного. В этом случае задача сводится к переопределенной системе, решаемой методом квазиобращения. В диссертации получены оценки погрешностей многочастотного метода. Проанализирована устойчивость методов к естественным вариациям высотных профилей метеопараметров, которые априорно точно неизвестны. Этот анализ выполнен методом прямого и обратного моделирования на материале высотных профилей, измеренных радиозондами. Показано, что многочастотный метод устойчив к естественным вариациям, а его результаты точнее использования стандартного профиля. Для двухчастотного метода этот вывод остается в силе, однако среднеквадратичная ошибка полной массы водяного пара примерно на 3% выше.

Четвертая глава посвящена радиометрическому зондированию облачной атмосферы из космоса. Поглощение в развитых кучевых облаках на частотах 22.2 и 36 ГГц не превышает 1.5 нп, поэтому точность двухчастотного метода должна быть удовлетворительной. Однако при зондировании из космоса пространственное разрешение СВЧ радиометров оказывается слишком грубым, от 5 до 60 км. В силу нелинейной связи яркостной температуры с водностью усреднение по такой ячейке приводит к значительным систематическим ошибкам решения обратной задачи. С целью оценки влияния пространственного распределения облачности на точность определения интегрального влагосодержания, в диссертации рассмотрена модель распределения облаков по размерам. Анализ базы снимков позволил найти среднюю связь между размером облака и его мощностью. Этот анализ позволил построить модель уходящего излучения разорванных облачных полей и его усреднения на главном лепестке диаграммы направленности СВЧ-радиометра космического базирования. На его основе были найдены доверительные интервалы водозапаса облаков. Оценки систематических ошибок влаго- и водосодержания были получены методом компьютерного моделирования по замкнутой схеме для различных наборов параметров, характеризующих динамику восходящих воздушных потоков.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями, написана грамотно и ясно, подтверждает высокий уровень научной квалификации

диссертанта, его глубокие знания актуальных задач физики и способность получать значимые научные результаты.

Достоверность представленных результатов обеспечивается тем, что в работе использованы известные физические модели, проверенные статистические методы и проведена верификация новых методов на основе сравнения данных численного моделирования с реальными наблюдениями.

Новизна диссертационной работы заключается в том, что 1) Получены новые данные о сезонной изменчивости спектра яркостной температуры атмосферы (18–27.2 ГГц), 2) Впервые получены частотные спектры временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы и продемонстрировано, что частотный спектр интенсивности временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего излучения ясного неба повторяет форму частотного спектра поглощения в водяном паре приземного слоя атмосферы, 3) Разработаны программные библиотеки для решения прямых и обратных задач дистанционного зондирования атмосферы, 4) Впервые рассмотрено влияние пространственного распределения облаков на ошибки восстановления полной массы водяного пара и водозапаса по усредненному в поле зрения спутникового микроволнового радиометра излучению.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что данные о флуктуациях яркостной температуры будут полезны для оценки флуктуаций фазового запаздывания сигналов в атмосфере. Результаты работы могут найти применение в радиоастрономии, при разработке спутниковых систем связи и навигации, в радиолокационной интерферометрии. Полученные результаты свидетельствуют о возможности повышения эффективности решения обратных задач восстановления температуры, влажности, влаго- и водозапаса атмосферы по данным радиометрических наблюдений.

При оценке диссертационной работы следует отметить некоторые недостатки:

1. Частоты 10^9 – 10^{12} ГГц в разделе 1.2 на стр. 29 – опечатка, автор имел в виду 10^9 – 10^{12} Гц. Впрочем, интервал частот можно было указать и точнее, т.к. интервал энергий 10^{-3} – 10^{-5} эВ охватывает 2, а не 3 порядка.
2. В разделе 2.2. на стр. 52, говоря о приближенной калибровке с использованием модели вместо холодного эталона, на основе формулы (2.2) следовало привести оценку точности такой калибровки, связанную с оценкой точности модели.
3. Говоря о «достоверности по R^2 », следовало пояснить, что речь идет о коэффициенте детерминации, дать его определение со ссылками, и, самое главное, описать процедуру его вычисления по 40 сеансам наблюдений. Автор пишет, что «достоверность по R^2 ... говорит о хорошем линейном приближении этой зависимости», хотя фактически такое значение коэффициента детерминации говорит о любой функциональной зависимости, не обязательно линейной.
4. В разделе 2.4 на стр. 57 следовало пояснить, что такое «эффективная длина электромагнитной волны в атмосфере».
5. В тексте я не нашел обсуждения рисунка 2.13: приводимые там структурные функции выходят насыщение на временном масштабе около 400 с.

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертация Егорова Д.П. представляет собой законченное исследование, научная значимость и оригинальность которого не вызывают сомнения. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию при анализе экспериментальных данных и их ком-

пьютерной обработке. Сделанные в диссертации выводы являются обоснованными и имеют высокую практическую значимость.

Автореферат работы Егорова Д.П. соответствует содержанию, достаточно полно отражает структуру диссертации и даёт возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне. Диссертационная работа в целом представляет собой законченный научный труд, основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в 8 научных работах, опубликованных в авторитетных научных изданиях, включенных в перечень ВАК, и 12 научных работах, опубликованных в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Работа прошла апробацию на ведущих российских и международных конференциях. Таким образом, диссертация соответствует пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемых к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Из вышеизложенного следует, что представленная к защите диссертационная работа Егорова Д.П. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым на соискание учёной степени кандидата наук, а сам Егоров Д.П. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 — «Радиофизика».

Официальный оппонент,
заведующий лабораторией турбулентности
и распространения волн
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии Наук (ИФА РАН)
доктор физико-математических наук,



Горбунов Михаил Евгеньевич

Специальность 01.04.03 – радиофизика
Адрес: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3
Телефон: +7 (495) 951-95-74
E-mail: gorbunov@ifaran.ru

Подпись Горбунова М.Е. заверяю.
Ученый секретарь
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии Наук
кандидат географических наук



Краснокутская Людмила Дмитриевна

26.03.2024