

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института космических исследований
Российской академии наук (ИКИ РАН)
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.



Петрукович А.А.

« 18 » марта 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 Доброслава Павловича на тему «Пространственные неоднородности атмосферы и учет их влияния при СВЧ-радиометрическом зондировании Земли из космоса» общим объемом 114 стр. машинописного текста, состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Она содержит 10 таблиц и 37 рисунков. Библиография включает 91 наименование.

Актуальность темы исследования обусловлена, прежде всего, необходимостью повышения качества и достоверности информации, получаемой с помощью средств пассивного микроволнового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Рассмотренные в диссертационной работе нелинейные эффекты, связанные с пространственной неоднородностью атмосферы, позволяют учесть ее негативное влияние на точность решения обратных задач ДЗЗ из космоса, что повышает надежность метеорологических и климатических прогнозов. Пространственно-временные флуктуации излучения атмосферы, вызванные тропосферной турбулентностью, являются существенным мешающим фактором в радиофизических приложениях. Понимание причин флуктуаций, их взаимосвязи с различными атмосферными процессами и погодными условиями помогает улучшать качество радиоастрономических наблюдений, повышать эффективность и надежность работы спутниковых систем связи и навигации.

Целью работы является получение новых данных о флуктуациях микроволнового излучения атмосферы Земли на длительных временных интервалах и при различных погодных условиях, а также исследование влияния характера пространственного распределения облаков на точность решения обратных задач при СВЧ-радиометрическом зондировании Земли из космоса.

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

1. Постановка и проведение вычислительного эксперимента по расчету пространственных полей яркостной температуры нисходящего излучения облачной атмосферы и уходящего излучения системы «облачная атмосфера – подстилающая поверхность» (3D) с использованием средств высокопроизводительной техники вычислений общего назначения на графических процессорах GPU на основе технологии CUDA.
2. Расчетно-аналитическое сопровождение 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). Разработка алгоритмов автоматической классификации сеансов СВЧ-радиометрических измерений по типу наблюдаемой облачности.
3. Оценка точности методов восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы. 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.

Автор выносит на защиту следующие научные **положения**:

1. Монотонный рост интенсивности флуктуаций 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 достигает 10 К.
4. На ошибки восстановления влагозапаса и водозапаса, связанные с нелинейностью зависимости яркостной температуры от водности и термодинамической температуры облака, оказывает влияние характер пространственного распределения облаков в элементе разрешения антенны спутникового микроволнового радиометра. Для случая кучевых облаков при размерах элемента разрешения от 10×10 км относительная ошибка восстановления этих интегральных параметров может превышать 10-15%.

По теме диссертации опубликовано 39 научных работ, включая 8 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 13 публикаций в изданиях, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science или Scopus и 18 работ, входящих в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Результаты, представленные в диссертации, получены в рамках выполнения государственных заданий. Ряд результатов получен в ходе работ по проектам РФФИ.

Основные **результаты** диссертационного исследования подтверждают выносимые на защиту положения и заключаются в следующем:

1. Установлено, что в условиях отсутствия облачности или при наличии кучевых облаков слабого вертикального развития *Cu fra* 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.
2. 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 крупномасштабных горизонтально-вытянутых неоднородностей размером 6 км и более.
3. 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.

4. 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).
5. Разработан алгоритм автоматической классификации сеансов СВЧ-радиометрических измерений по типу наблюдаемой облачности путем анализа частотных спектров структурной функции яркостной температуры на фиксированных временных интервалах.
6. 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 (плоскостной) моделей облачности, которые игнорируют особенности пространственного распределения реальных облачных полей.
7. Разработана и программно реализована методика расчета радиационных характеристик пространственно-неоднородных облачных полей в 3D с использованием программно-аппаратной архитектуры CUDA.
8. 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.

Научная и практическая значимость.

Полученные в диссертационной работе данные о флуктуациях радиоизлучения атмосферы могут быть полезны для оценки пространственно-временных флуктуаций фазового запаздывания. Как в случае яркостной температуры, так и в случае фазового запаздывания флуктуации вызываются тропосферной турбулентностью поля влажности. Результаты диссертационного исследования 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. Одним из важнейших результатов здесь является то, что впервые показана принципиальная возможность использования флуктуационной компоненты излучения для определения типа наблюдаемой облачности по данным именно СВЧ-радиометрии без привлечения данных других диапазонов.

Наибольший интерес представляют результаты проведенного автором вычислительного эксперимента по оценке систематических ошибок

восстановления интегральных параметров влаго- и водосодержания атмосферы из космоса, связанных с пространственной неоднородностью зондируемых облачных полей. В научной литературе по данному вопросу в качестве меры неоднородности облачных полей рассматриваются лишь дисперсия или стандартное отклонение истинного водосодержания от его средней по площади элемента разрешения величины. Приведенные автором оценки упомянутых ошибок в зависимости от значений параметров статистической модели Планка для неоднородной облачности в сущности позволяют ввести необходимые поправки в восстанавливаемые величины влаго- и водосодержания, как только получена дополнительная информация о пространственном распределении жидкокапельных облаков в некоторой сопряженной с полем зрения радиометра области атмосферы. Таким образом, полученные по этой части результаты могут лечь в основу новых эффективных алгоритмов совместной обработки данных измерений в СВЧ, ИК и/или видимом диапазонах.

Основные **вопросы**, которые возникли при прочтении работы, и **замечания**:

1. Прежде всего, восприятие работы усложняет отсутствие разделов с выводами после каждой главы. При изложении материала автору следовало бы четче обозначить, какие именно из полученных им результатов подтверждают выносимые на защиту положения.
2. Автор неоднократно пишет «облака», подразумевая под этим именно кучевые облака. В некоторых местах это может привести к неверному истолкованию текста.
3. В разделе 2.2 автор описывает классическую методику калибровки, после чего утверждает, что часть сеансов, однако, калибровалась по другой известной методике, предполагающей использование яркостной температуры модельной безоблачной атмосферы взамен холодного эталона. Указано, что ошибка определения уровня яркостной температуры при этом может достигать 3-5 К. Неясно, влияет ли выбор методики калибровки на результаты, в дальнейшем изложенные во второй главе.
4. Приведенные в разделе 2.4 соотношения показывают, что полученные автором результаты могут быть использованы для атмосферной коррекции в радиоастрономии, однако, автор никак не акцентирует этот момент.
5. Изложенная в разделе 2.6 методика классификации типов облачности по флуктуационной компоненте яркостной температуры в К-диапазоне оставляет впечатление незавершенности и не упоминается в разделе о практической значимости работы. Из представленных автором материалов не следует, например, что слоистая облачность поддается такой классификации. Также неясно, что происходит в случаях смешанной облачности.
6. В четвертой главе для восстановления влаго- и водозапаса используется двухчастотный метод. Проведено сравнение результатов

восстановления для трех комбинаций частотных каналов: 22.2 ГГц и 27.2 / 36 / 89 ГГц. Чем обусловлен выбор частот 36 и 89 ГГц?

7. Желательно, чтобы полученные в ходе эксперимента по измерению флуктуаций атмосферного излучения результаты, представленные во второй главе, были бы учтены в четвертой главе при оценке ошибок восстановления влаго- и водозапаса. Автору следовало бы рассмотреть величины ошибок, которые возникают при восстановлении интегральных параметров по средним за сеанс значениям яркостной температуры.

Указанные замечания не носят принципиальный характер и не снижают общей высокой оценки работы.

Резюмируя вышесказанное, можно констатировать, что диссертация Егорова Доброслава Павловича «Пространственные неоднородности атмосферы и учет их влияния при СВЧ-радиометрическом зондировании Земли из космоса» соответствует паспорту специальности 1.3.4 «Радиофизика» и представляет собой законченное и самостоятельное научное исследование. По объему результатов, достоверности, научной и практической значимости выводов диссертация удовлетворяет всем требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.009.2013 г. № 824 <https://docs.cntd.ru/document/499047147?marker=65A0IQ>), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Егоров Доброслав Павлович, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Отзыв подготовлен:

Заведующий отделом «Исследования Земли из космоса» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук,
доктор физико-математических наук
Ермаков Дмитрий Михайлович



Научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук
Пашинов Евгений Владимирович



Работа была доложена и одобрена на семинаре Отдела «Исследования Земли из космоса» 11 января 2024 г.

Отзыв заверен:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Кандидат физико-математических наук
Андрей Михайлович Садовский



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, 117485, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, тел. +7-495-333-52-12, факс +7-495-333-12-48, эл. почта iki@cosmos.ru