

УТВЕРЖДАЮ
директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института физики атмосферы им. А.М.Обухова
Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)

д.ф.-м.н.

« 27 » апреля 2022



Куличков С.Н.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Пашинова Евгения Владимировича
«Восстановление трехмерных полей тропосферного водяного пара по данным
многочастотных дистанционных радиометрических измерений»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – радиофизика

Диссертационное исследование Пашинова Евгения Владимировича на тему
«Восстановление трехмерных полей тропосферного водяного пара по данным
многочастотных дистанционных радиометрических измерений» состоит из введения,
4 глав, заключения и списка литературы и 1 приложения.

Актуальность темы исследования объясняется возрастающей ролью
дистанционного зондирования в исследовании процессов на поверхности океана и в
атмосфере. Анализ динамики атмосферных процессов на основе данных спутникового
мониторинга было признано актуальным и перспективным практически с начала
спутниковой эры. И особую роль здесь играет радиотепловое зондирование, позволяющее
получать всепогодную, регулярную и глобальную в масштабах Земли информацию.
Данные микроволновых радиометров, находящихся на орбите, используются для
восстановления характеристик приводного ветра, влагосодержания атмосферы,
температуры и солености океана, сплоченности и структуры ледяного покрова, снежного
покрытия, водозапаса почвы и многих других параметров. Благодаря возможности
ежесуточного восстановления основных геофизических параметров системы атмосфера-

океан пассивное микроволновое зондирование способно обеспечить исследователей информацией об изменчивости основных метеорологических полей в масштабе всей планеты, а также о зарождении и эволюции основных мезомасштабных и синоптических процессов. Исследование состава водяного пара в атмосфере играет особую роль. Информация о глобальном распределении атмосферной влаги является одним из ключевых факторов для развития климатологии и климатических моделей и исследования генезисов тропических и внетропических циклонов. Поэтому актуальность представленной работы не вызывает сомнений. Решение поставленных в работе задач способствует развитию атмосферного моделирования и улучшению методов прогноза опасных атмосферных явлений.

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

Для достижения поставленной цели диссертантом были решены следующие задачи:

1. Проведён анализ современных методов восстановления вертикального распределения влажности атмосферы Земли по данным спутниковых радиотепловых измерений.
2. Проведены компьютерные расчёты чувствительности различных радиометрических каналов к вариациям профиля влажности на различных высотах, показана их низкая чувствительность в слое 1–5 км. Предложен и обоснован набор частот, обеспечивающий повышение качества восстановления профиля водяного пара.
3. Проведён натурный эксперимент по восстановлению профиля влажности тропосферы при зондировании с поверхности Земли на основе дифференциальных радиотепловых измерений, который подтвердил эффективность подхода и возможность восстановления сложных профилей с инверсией.
4. Разработан и проверен на практике нейросетевой алгоритм, улучшающий точность восстановления вертикального распределения влажности атмосферы на основе данных радиотеплового спутникового зондирования с дополнительным использованием радиометрических каналов в полосе 22,235 ГГц. Восстановлены

глобальные трёхмерные поля водяного пара за 1,5 года на основе данных измерений спутникового микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2

Результаты диссертационного исследования подразумевают непосредственное использование разработанных методов и алгоритмов для исследования трёхмерных полей водяного пара атмосферы на различных масштабах с использованием данных дистанционного зондирования. Это показывает высокую **научную и практическую значимость** работы. Также в работе показана возможность использования спутниковой информации для оценки динамики мезомасштабных и синоптических процессов.

Полученные диссертантом научные результаты реализованы в виде алгоритма восстановления профиля водяного пара в тропосфере Земли по данным радиометрических измерений с поверхности Земли и из космоса. Алгоритм апробирован для восстановления трёхмерных полей водяного пара в атмосфере.

Основные результаты, представленные в диссертации, получены в рамках исполнения государственных заданий. Ряд результатов получен в ходе работ по проектам РФФИ и при подготовке эскизного проекта СЧ ОКР «Конвергенция».

Содержание, представленной на отзыв диссертации, хорошо структурировано и соответствует поставленным цели и задачам, отражает заявленные автором исследовательские подходы и может быть оценено как полное описание аргументаций, выдвинутых соискателем положений на защиту.

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, освещено современное состояние исследуемой проблемы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** содержится обзор литературы, посвященной исследуемой тематике. В ней кратко описывается текущее состояние исследований глобального распределения водяного пара в атмосфере Земли, приводится анализ развития методов пассивного микроволнового дистанционного зондирования Земли и существующих приборов, позволяющих восстанавливать профиль влажности атмосферы Земли.

Во **второй главе** приводится обоснование первого и второго положений, выносимых на защиту. Глава посвящена исследованию проблематики существующих радиофизических

подходов радиотеплового зондирования профиля влажности атмосферы. Для этого описана модель формирования излучения системы океан – атмосфера и проведено исследование профилей влажности атмосферы различных географических зон на основе данных корабельного радиозондирования. Показано, что наиболее энергетическая и изменчивая часть профиля влажности атмосферы (1,5–4,5 км) не может быть хорошо прозондирована из космоса имеющимися радиотепловыми приборами и методами ДЗЗ.

Третья глава посвящена описанию и доказательству возможности применения дифференциальных радиотепловых измерений для более точного восстановления профиля влажности нижней тропосферы 0–5 км как с поверхности Земли, так и из космоса. Для проверки теории был проведён эксперимент с использованием перестраиваемого радиометра Р22М (18–27,2 ГГц), который подтвердил возможности дифференциальных радиотепловых измерений и показал, что с его помощью можно восстанавливать профили влажности тропосферы с высотным разрешением 1 км.. (Положения 3, выносимое на защиту).

Четвертая глава посвящена разработке методики восстановления глобальных трёхмерных полей влажности с использованием дополнительных частот, требуемых для дифференциального дифференциальных измерений. Показана возможность и целесообразность использования искусственных нейронных сетей (ИНС) для восстановления глобальных трёхмерных полей влажности по спутниковым данным. На основе модельных данных КЭ «Конвергенция» разработана топология ИНС для восстановления трёхмерных полей влажности, которая была применена для обработки реальных данных МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2. С помощью разработанного нейросетевого алгоритма были восстановлены глобальные трёхмерные поля влажности по данным МТВЗА-ГЯ за 1,5 года и показано хорошее соответствие результатов восстановления с радиозондовыми измерениями. (положение 4).

В **приложении 1** приводятся примеры восстановленных полей влажности на различных атмосферных уровнях по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2.

В результате рассмотрения вопросов, поставленных в работе перед диссертантом, Пашинов Евгений Владимирович приходит к ряду заслуживающих поддержки выводов, отражённых в **заключении**.

1. Анализ данных судовых радиозондовых измерений и результаты моделирования микроволнового излучения системы океан – атмосфера показали, что из-за сильного поглощения вблизи линии 183,31 ГГц радиометрические измерения на типичном наборе частот 165,5–183,31 ГГц слабо чувствительны к изменению профиля влажности тропосферы ниже 4 км, где сосредоточена большая часть водяного пара. Это позволяет сделать вывод, что необходим поиск новых методов радиотеплового зондирования из космоса, которые могли бы обеспечить повышение точности восстановления профиля водяного пара в слое 1–4 км.
2. Теоретически исследована возможность применения нового подхода дифференциальных радиотепловых измерений в полосе поглощения 22,235 ГГц для повышения точности восстановления профиля влажности в нижней тропосфере как при зондировании с поверхности Земли, так и из космоса.
3. Проведён наземный эксперимент с использованием перестраиваемого радиометра 18–27,2 ГГц, который подтвердил возможности подхода дифференциальных радиотепловых измерений и показал, что с его помощью можно восстанавливать профили влажности тропосферы с высотным разрешением 1 км. В ходе эксперимента наилучшие результаты восстановления с корреляцией между истинным и восстановленным профилем порядка 0,9 были получены на высотах от 1,5 до 6,5 км.
4. Найдены оптимальные значения частот дополнительных радиотепловых каналов для измерения профиля влажности нижней тропосферы в ходе реализации КЭ «Конвергенция». Дополнительные каналы имеют вертикальную поляризацию и следующие частоты: 24 ГГц, 25,5 ГГц; 26,5 ГГц. Расчётные оценки показывают, что применение дополнительных каналов в полосе 22,235 ГГц совместно с каналами в области 183,31 ГГц в КЭ «Конвергенция» может существенно улучшить восстановление профиля влажности на высотах от 0 до 4,5 км.
5. На основе результатов моделирования радиометрических сигналов разрабатываемого прибора МИРС КЭ «Конвергенция» был создан алгоритм восстановления глобальных трёхмерных полей водяного пара с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). Использование в качестве дополнительной входной информации для ИНС яркостной температуры дополнительных каналов МИРС КЭ «Конвергенция» в полосе 22,235 ГГц совместно с каналами 183,31 ГГц и профилем

температуры позволяет существенно (на 15 %) уменьшить ошибку восстановления профиля влажности атмосферы на высотах от 1 до 4,5 км. В результате было показано, что в ходе КЭ «Конвергенция» с помощью ИНС можно восстанавливать профиль влажности атмосферы с относительной ошибкой мене 32 % на высотах от 0 до 10 км.

6. Разработанный для КЭ «Конвергенция» подход, использующий ИНС, был применён для восстановления глобальных трёхмерных полей водяного пара на основе данных реального спутникового радиотеплового комплекса МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2. Для восстановления профиля влажности тропосферы по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2 был разработан двухэтапный нейросетевой алгоритм, состоящий из двух последовательно соединённых однослойных ИНС прямого распространения. Первая ИНС восстанавливает профиль температуры атмосферы, вторая — влажности. ИНС для профиля влажности содержит 12 нейронов в скрытом слое с сигмоидной передаточной функцией. Разработанный алгоритм позволил восстановить глобальные трёхмерные поля водяного пара в атмосферы Земли по данным МТВЗА-ГЯ «Метеор-М» № 2 за 1,5 года.

Основные вопросы, которые возникли при прочтении работы:

Прежде всего, восприятие работы усложняет тот факт, что автор не указывает, результаты каких его публикаций отражены в каждой главе.

1. Автор неоднократно употребляет термин «Нижняя тропосфера», «Верхняя тропосфера». Какие это высоты? При этом нигде не приводятся более распространённые термины «Пограничный слой атмосферы», приземный (приводный) слой. И что автор подразумевает под понятием «инверсия профиля влажности»? Обычно говорят о температурных инверсиях, что уже приводит к концентрации водяных паров на определенных уровнях.

2. Автор утверждает что «Наиболее сильно и динамично процессы переноса тепла и влаги в атмосфере происходят над тропическими районами океана». Наиболее сильно и динамично они происходят в энергоактивных зонах, ни одна из которых в тропических районах не находится, а также в полярных районах на границе кромки льда при холодных вторжениях. В тропических районах подобные процессы наблюдаются только в тропических циклонах.

3. При анализе данных автор часто путает климатологию и метеорологию. Климатология работает с климатической изменчивостью, а синоптические процессы, исследуемые автором – это метеорология.
4. Первое положение, выносимое на защиту, звучит как: « Результаты моделирования подтвердили....» То есть результат уже существовал раньше? Положением, выносимым на защиту, не может быть еще одно подтверждение ранее полученного результата.
5. Автор пишет, «что сравнение результатов восстановления с данными реанализа ECMWF показывает немного меньшие ошибки. Это может говорить о плохом качестве зондовых измерений из-за несовершенства технологий используемых датчиков влажности тех лет». Во-первых, какой из реанализов ECMWF? Во вторых, в реанализах усваиваются аэрологические данные. То есть сравнение данных аэрологического зондирования с данными реанализа само по себе некорректно, а расхождение свидетельствует не о качестве измерений, а о качестве модели.
6. Проанализировав судовые радиозондовые измерения, автор пришел к выводу, что основная масса водяного пара сосредоточена в толще атмосферы на высотах от 0 до 5 км. Этот вывод очевиден и известен из школьного учебника географии
7. Чем руководствовался автор, выбирая реанализ ERA5 для сравнения с данными в прибрежной зоне? Он хорошего качества, но разрешение лучше у (ERA-Interim). И все атмосферные реанализы плохо работают в прибрежной зоне.
8. При применении разработанной методики к отечественному радиометру МТВЗА-ГЯ отсутствуют данные о его калибровке. И было бы полезно провести сравнение получаемых трехмерных полей с данными того же реанализа или атмосферного моделирования, например, с использованием модели WRF.
9. Работе не хватает конкретных примеров применения разработанных методов для исследования погодных и климатических процессов. В частности, во введении много говорится о тропических циклонах и атмосферных реках. Было бы интересно проверить возможность идентификации этих явлений по данным, например, МТВЗА-ГЯ
10. Автор пишет, что «проводить восстановление профиля влажности тропосферы на основе данных КЭ «Конвергенция» с хорошим для микроволновой радиометрии качеством, которое может превышать существующие аналоги». Но такое утверждение требует доказательства с представлением результатов тщательного сравнения с

существующими зарубежными аналогами и валидацию на независимых источниках, например, данных наземных измерений.

В заключении хотелось бы сказать, что высказанные замечания имеют в основном дискуссионный и рекомендательный характер, и не умоляют общую положительную оценку проделанной соискателем работы. Работа производит хорошее впечатление. Несомненным достоинством является то, что все теоретические результаты подтверждаются данными специализированных экспериментов.

Основные положения диссертации отражены в её автореферате, в 8 научных публикациях из списка ВАК, а также прошли обсуждения на более чем 15 российских и зарубежных конференциях.

Диссертация представляет собой результат грамотного научного исследования, выполненного на высоком профессиональном уровне и отличающегося новизной предложенных методов и подходов к решению поставленных задач..

Результаты, полученные автором, представляют интерес для организаций РАН (ИОРАН, ИФА, ИПФ, ИВМ, ИПМ, ИВП, ИКИ), Росгидромета (ГОИН, ААНИИ, ГГО, ИПГ) и других, занимающихся атмосферными, климатическими и прикладными исследованиями. Изложенные в работе результаты могут быть применимы для задач анализа атмосферных процессов по данным дистанционного зондирования и мониторинга и прогноза динамики атмосферы, в том числе опасных атмосферных явлений.

Обобщая содержание отзыва можно утверждать, что диссертационная работа Е.В. Пашинова представляет самостоятельное, законченное и серьезное научное исследование, соответствующее мировым стандартам в области геофизических исследований. Основные цели диссертационной работы достигнуты. Положения, выносимые на защиту, в совокупности составляют научное достижение, сутью которого является развитие метода восстановления трехмерных полей влажности в атмосфере по данным микроволнового зондирования.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

Представленная диссертация **«Восстановление трехмерных полей тропосферного водяного пара по данным многочастотных дистанционных радиометрических измерений»**, отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а

её автор Пашинов Евгений Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Отзыв подготовлен:

Заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Доктор физико-математических наук
Репина Ирина Анатольевна

Работа была доложена и одобрена на семинаре Отдела динамики атмосферы ИФА им. А.М. Обухова РАН 26 апреля 2022 г. (протокол семинара № 1/22).

Заведующий Отделом динамики атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Академик
Голицын Георгий Сергеевич



Отзыв заверен:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Кандидат географических наук
Краснокутская Людмила Дмитриевна



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, 119017, Москва, Пыжевский пер. 3. Тел: 8(495) 951 55 65, факс 8(495) 951 16 52 email: ifaran@ifaran.ru

27 апреля 2022