

## УТВЕРЖДАЮ

Вр. и. о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук академик РАН



 Семенов В.А.

«30» августа 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Беликовича Михаила Витальевича «Развитие радиофизических методов анализа данных дистанционного зондирования для исследования и прогноза атмосферных явлений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 -радиофизика

Задачи и результаты диссертации нацелены на развитие методов дистанционного зондирования атмосферы Земли. Рассматривается обширный спектр задач: наземное пассивное микроволновое зондирование тропосферы, интерпретация мезосферных спутниковых измерений в оптическом диапазоне, оценка систематических ошибок микроволновых лимбовых измерений в средней атмосфере. В каждом из перечисленных направлений рассматриваются и фундаментальные вопросы, решение которых необходимо для решения актуальных практически значимых приложений, и сами эти приложения.

В настоящий момент основным источником данных о вертикальной структуре атмосферных характеристик тропосферы все еще являются радиозонды. Эти данные используются для современного прогноза погоды, имеющего огромное значение для хозяйственной деятельности. Спутниковое зондирование, несомненно, обладает рядом преимуществ, но, на сегодняшнем уровне, оно не предоставляет надежных измерений температуры и влажности на высотах менее 3 км. Более точный прогноз, кроме более совершенных и сложных математических моделей, требует в первую очередь более совершенных данных о структуре тропосферы. Экстенсивное увеличение плотности радиозондовых станций затруднено с экономической точки зрения. Особенно острой является проблема сверхкраткосрочных прогнозов (наукастинга), где требуется своевременная прогностическая информация на временных масштабах от десяти минут до часа. Наукастинг особенно востребован для задач авиационной безопасности, в которых

применение традиционных радиозондов затруднено. Поэтому в этой области особенно актуальным является развитие дистанционных измерений.

Микроволновые профилометры имеют ряд преимуществ, важных для наукастинга: высокое временное разрешение, намного меньшие требования к прозрачности атмосферы по сравнению с оптическими приборами, возможность работы в условиях аэропорта, и, что не маловажно, относительно невысокая стоимость и простота обслуживания. Поэтому развитие наукастинга с использованием этих приборов является, бесспорно, актуальным направлением.

Область мезосферы и нижней термосферы (МНТ) является наименее изученной частью земной атмосферы. Развитие методов ее наблюдения имеет фундаментальное значение. Исследования МНТ имеют и значимую практическую составляющую. В частности, на этих высотах располагаются D и частично E- слои ионосферы, влияющие на распространение радиоволн в атмосфере. На первый план выходит задача поиска климатических предикторов. В задаче поиска климатических предикторов особое значение имеет фотохимия области МНТ, определяющая поведение ряда ключевых малых газовых составляющих атмосферы. Многочисленные спутниковые кампании нацелены на ее изучение. Ввиду того, что измерения, как правило, не прямые, а их обработка основана на различных априорных приближениях, типичным является наличие значительных систематических ошибок в извлекаемых из данных измерений атмосферных характеристиках. Поэтому конструктивная критика и коррекция существующих методов получения данных о малых газовых составляющих важны и актуальны.

Не менее острой является задача оценки систематических ошибок в спутниковых измерениях концентрации малых газовых составляющих средней атмосферы. Наиболее достоверными в этой области считаются ракетные *in situ* измерения. Ракетные пуски достаточно редки. Даже если орбита спутника позволяет произвести сравнение измеряемых характеристик с ракетными данными (что удастся сделать достаточно редко), то в силу наличия шума измерений оно может не давать однозначной информации о систематической ошибке измерений, а также зависимости ошибки от географического положения. Поэтому методическая работа по выявлению систематических отклонений в измерениях актуальна, и задача поиска и усовершенствования таких методов также очень важна.

Диссертация включает в себя введение, три главы, заключение, два приложения и список литературы. Объем насчитывает 140 страниц, включая 42 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 149 ссылок.

Первая глава посвящена задаче применения микроволновых профилометров в наукастинге. Глава содержит три раздела. После краткого описания прибора HATPRO в первом разделе, следует рассмотрение выбора наиболее близкой к реальности модели поглощения атмосферного воздуха, которая является обязательным участником процедуры восстановления термической структуры тропосферы по радиометрическим данным. Выбор модели осуществляется на основе сопоставления, рассчитанного с помощью модели на основе радиозондовых данных спектра собственного излучения атмосферы и соответствующих спектральных измерений прибором HATPRO. Проведен тщательный анализ бюджета ошибок рассчитанных с помощью различных моделей спектров. Наиболее близкой к измерениям оказалась модель на основе формализма ECS.

В последнем разделе в качестве первого шага адаптации микроволновых профилометров для целей наукастинга, анализируются прогностические характеристики набора из 15 стандартных индексов конвективной неустойчивости, вычисленных по результатам микроволнового профилометра HATPRO. Сравнение с аналогичными индексами, посчитанными по соответствующим радиозондовым данным в Нижнем Новгороде показывает, что в случае измерений индексы по микроволновым данным имеют лучшие предсказательные характеристики.

Во второй главе приводится конструктивная критика методов определения малых газовых составляющих, в первую очередь атомарного кислорода, прибором SABER/TimeD. Ключевыми для используемого в настоящее время метода определения ночного и дневного O по измерениям SABER являются соотношения, полученные на основе предположения о фотохимическом равновесии озона в дневное и ночное время.

На основе трехмерного химико-транспортного моделирования показано, что граница применимости предположения о равновесии ночного O<sub>3</sub> лежит значительно выше нижней границы используемого метода, заявленной командой SABER, что приводит к заведомо неверным определяемым значениям O, а также N в диапазоне высот 80-87км. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие работу найденных в диссертации критериев, определяющих реальную границу условия равновесности ночного озона. Указывается на возможность приблизительного определения границы по максимуму хорошо измеряемой со спутников объемной плотности свечения возбужденного гидроксила. Показана результативность критерия, полученного из соотношения между временем релаксации (времени жизни) и характерного времени изменения равновесного значения концентрации ночного озона.

На результатах моделирования показано, что в условии фотохимического равновесия дневного озона необходимо, помимо реакции фотодиссоциации, так же учитывать его реакцию с атомарным водородом. Сравнительный анализ стоков озона показывает, что в зависимости времени года и географического положения вклад реакции с H может достигать 70% от вклада фотодиссоциации в уничтожение озона. На реальных данных SABER оценена величина ошибки в определении O, OH, HO<sub>2</sub> и химического тепла, вызванная неучетом данной реакции.

Третья глава развивает метод статистической валидации одновременных измерений дневных концентраций O<sub>3</sub>, OH и HO<sub>2</sub> по данным спутникового прибора MLS/Aura. Ключевым для метода является использование алгебраического соотношения между концентрациями малых газовых составляющих, полученного из условия их одновременного фотохимического равновесия. В главе описан метод, основанный на вероятностном рассмотрении процесса измерений; продемонстрированы проблемы применимости данного метода связанные, с неопределенностью выбора априорной функции распределения и наличием неизбежного систематического смещения, демонстрируемого методом; приведен альтернативный выбор априорной функции распределения; описана процедура оценки систематических ошибок метода на основе использования идеальных искусственных данных; даны общие рекомендации для использования метода.

Достоверность и обоснованность научных результатов, полученных в диссертации, несомненны. Они являются результатом применения общепринятых физических и математических методов: теории распространения излучения, анализа ошибок, линейной алгебры, теории вероятности. Трехмерное химико-транспортное моделирование производилось посредством хорошо зарекомендовавших себя в мировой практике моделей. Основные результаты, полученные диссертантом, прошли необходимую апробацию в докладах конференций и в статьях рецензируемых журналов.

Все основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту, являются новыми.

Впервые предложена адекватная со спектроскопической точки зрения модель поглощения, значительно сближающая результаты симуляции спектра собственного излучения атмосферы в диапазоне 50-60 ГГц с наблюдениями.

Впервые оценено качество прогноза гроз по данным микроволновых наземных измерений.

Впервые оценены границы применимости предположения о химическом равновесии ночного озона. Показано, что предложенный критерий равновесности ночного озона хорошо соответствует найденным границам.

Впервые показана важность реакции озона с атомарным водородом в фотохимическом равновесии дневного озона. Оценено влияние учета данной реакции в определении концентраций O, OH, NO<sub>2</sub>.

Впервые обнаружена неоднозначность в разработанном ранее методе статистической оценки качества одновременных измерений концентраций нескольких атмосферных компонент, основанном на условии их фотохимического равновесия, связанная с различным способом выбора предельного перехода от трехмерного вероятностного распределения к поверхностному. Впервые предложен альтернативный предельный переход типа «одеяло», который приводит к наименьшим систематическим ошибкам метода.

Выбор более адекватной модели поглощения и использование ее в создании процедуры восстановления позволит уменьшить систематическую ошибку наблюдений.

Сделаны первые шаги по адаптации индексов конвективной неустойчивости к данным микроволновых профилометров.

Доказано, что предшествующие результаты исследований, в которых условия равновесия ночного и дневного озона на высотах МНТ использовались некорректным образом, подлежат пересмотру.

Исследования и последующая модификация метода статистической оценки качества одновременных измерений позволили оценить и уменьшить систематическую ошибку метода.

Кроме того, развиваемые в диссертации методы непрямого мониторинга наиболее важных, но плохо измеряемых характеристик МНТ имеют, на мой взгляд, важную практическую значимость не только для мониторинга этой области, но и других областей атмосферы.

Представленные в работе результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном значимом участии. В ряде статей М.В.Беликович фигурирует как первый автор.

Автореферат диссертации достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в журналах, индексируемых в базах WOS и Scopus, некоторые из них - в высокорейтинговых зарубежных международных изданиях.

В целом диссертационная работа представляет собой законченный труд. Результаты диссертации вносят значительный вклад в развитие методов дистанционного зондирования атмосферы Земли. В частности, результаты диссертации уверенно демонстрируют более высокую точность извлечения концентраций трудноизмеряемых малых компонентов области мезопаузы, чем это делалось до работ М.В.Беликовича.

Используемые данные и алгоритмы, в том числе и предлагаемые автором, хорошо описаны и, следовательно, проверяемы. Текст диссертации понятен и соответствует современному стилю научных публикаций. Иллюстрации адекватны по количеству и качеству.

**По работе имеются следующие вопросы и замечания.**

1. Первое из сформулированных положений, выносимых на защиту, можно понять неоднозначно, то ли ECS –лучшая из нескольких моделей, то ли она лучше всего работает в диапазоне 50-60 ГГц.
2. Обнаруженная в диссертации существенная нестыковка между симуляциями спектра собственного излучения по данным радиозондовых измерений и наблюдениями с помощью микроволнового профилометра должна, казалось бы, быть хорошо изучена для серийного коммерческого прибора, ввиду накопленного опыта использования прибора. Насколько значимо найденное несоответствие между моделями и реальностью в контексте процедуры восстановления?
3. Неочевидно, как значение выражения 2.5.1 можно определить непосредственно из данных SABER, поскольку измерения атомарного водорода опираются на предположение о фотохимическом ночного равновесии озона, которое и предполагается проверять.
4. Используемые при расчетах переноса малых компонент значения коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии, по-видимому, нужно оценивать как ориентировочные. Насколько чувствительны результаты расчета переноса к этим значениям?

Приведенные выше вопросы и мелкие замечания не снижают ценности работы, выполненной на высоком профессиональном уровне. Диссертационная работа Беликовича

Михаила Витальевича «Развитие радиofизических методов анализа данных дистанционного зондирования для исследования и прогноза атмосферных явлений» актуальна, содержит новые весомые результаты и отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации, Беликович Михаил Витальевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук Перцев Николай Николаевич, e mail [n.pertsev@bk.ru](mailto:n.pertsev@bk.ru), тел. +7 495 951 0480, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3.

Я, Перцев Николай Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Вед. н. с. ФГБУН ИФА им. А.М.Обухова РАН

д.ф.-м.н.

Перцев Н.Н.

Подпись Н.Н.Перцева заверяю.

Ученый секретарь ИФА им. А.М.Обухова РАН

к.г.н.



Краснокутская Л.Д.