

На правах рукописи



БЕЛИКОВИЧ Михаил Витальевич

**РАЗВИТИЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ПРОГНОЗА АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

1.3.4 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Научный руководитель

Фейгин Александр Маркович, доктор физико-математических наук
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Официальные оппоненты

Косцов Владимир Станиславович, доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Угольников Олег Станиславович, кандидат физико-математических наук
Институт космических исследований Российской академии наук

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук

Защита состоится «26» сентября 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 при Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте [irfran.ru](http://rfpa.ru) ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Автореферат разослан «1» августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

Общая характеристика диссертации

Актуальность работы

В настоящий момент дистанционное зондирование является важнейшим источником данных об атмосфере Земли. Стремительный рост накапливаемых объемов экспериментальной информации, вызванный появлением новых приборов как наземного, так и спутникового базирования, требует совершенствования методов обработки данных дистанционного зондирования. Можно выделить следующие основные пути решения этой проблемы: (1) адаптация разработанных ранее методов обработки информации для данных, получаемых новыми приборами; (2) валидация существующих и разрабатываемых физических и физико-химических моделей различных атмосферных процессов; (3) совершенствование существующих и разработка новых непрямых методов получения данных о неизмеряемых или плохо измеряемых характеристиках атмосферы. Проблема совершенствования методов обработки данных дистанционного зондирования особенно актуальна в тропосфере и области мезосферы и нижней термосферы (МНТ). Тропосфера (0-10 км в средних широтах) непосредственно влияет на повседневную жизнь людей. Численный прогноз погоды опирается на измерения профилей основных характеристик тропосферы (температуры, давления и влажности), поэтому развитие методов измерения этих характеристик, тем более дистанционных, актуально само по себе. В экономически актуальном свёрхкраткосрочном прогнозе погоды (наукастинге) с заблаговременностью до 6-12 часов особенно востребованы дистанционные измерения характеристик тропосферы с высоким временным разрешением. Поэтому начиная с середины 2000х годов коммерчески внедряются микроволновые пассивные спектрорадиометры (профилометры) для наукастинга. Эти приборы непрерывно измеряют спектры собственного излучения атмосферы в диапазонах, захватывающих линию излучения водяного пара (20-32 ГГц) и полосу излучения молекулярного кислорода (51-59 ГГц). По этим данным определяются (восстанавливаются) профили температуры и влажности в диапазоне высот 0-10 км с высоким временным (1-2 мин) разрешением. Процедура восстановления подразумевает использование модели распространения излучения атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн [1]. На сегодняшний день остается актуальной проблема повышения точности измерений микроволновых профилометров, прежде всего, температуры (см. [2]). Значимой составляющей бюджета ошибок этих измерений является неточность модели поглощения микроволнового излучения в атмосфере, так называемая, спектроскопическая ошибка. По оценкам, она может приводить к систематическим ошибкам более 1К, что неприемлемо для метеорологических приложений. В связи с этим актуально

уточнение спектроскопических моделей. Другая актуальная проблема — это, собственно, сверхкраткосрочный прогноз. Наиболее опасные метеорологические явления, в частности, грозовые штормы, представляют существенные сложности для моделей численного прогноза погоды, поскольку могут развиваться на масштабах, которые являются для этих моделей подсеточными. Один из основных методов сверхсрочного прогноза гроз основан на использовании индексов конвективной неустойчивости атмосферы (см. [3, 4]), которые рассчитываются по данным измерений профилей характеристик тропосферы. Изначально эти индексы создавались для прогноза по данным радиозондовых измерений, которые обычно осуществляются два раза в сутки (в 0 и 12 UTC). Актуальной является задача адаптации индексов конвективной неустойчивости к результатам микроволнового зондирования тропосферы. Один из первых шагов в этом направлении — оценка предсказательных возможностей современных индексов, вычисленных по микроволновым данным, является целью данной диссертации.

Развитие дистанционных методов мониторинга физико-химических процессов на высотах мезосферы – нижней термосферы (МНТ, 50-100 км) является актуальным с фундаментальной точки зрения, поскольку МНТ остается наименее изученной областью атмосферы, но особую важность представляют практически значимые аспекты исследования области МНТ. Низкие температуры (на высотах 80-90 км достигаются самые низкие температуры в атмосфере Земли: до 100 К и ниже) и концентрации газов делают область особенно восприимчивой к процессам, проходящим в нижележащих слоях. Так, климатические изменения на высотах МНТ выглядят существенно заметней, чем в нижней атмосфере. Согласно экспериментальным данным [5], скорость уменьшения температуры мезосферы во второй половине XX века достигала 0,5-1 К/год, в то время как наблюдаемые климатические измерения средней температуры поверхности Земли составляют всего 1,5-2К за период с 1850 по 2020 год. Таким образом, исследование характеристик протекающих в МНТ процессов является перспективным с точки зрения выявления индикаторов и/или предикторов изменений состояния всей атмосферы, вызванных как естественными, так и антропогенными факторами. Дистанционное зондирование является основным источником информации об области МНТ. Ее химический состав, температурный режим, динамические и химические процессы, а также энергетический баланс интенсивно изучаются крупными научными международными объединениями (например, Network for the Detection of Mesospheric Change [6]) и спутниковыми кампаниями (SABER/TIMED, MLS/Aura, SCIAMACHY-GOMOS-MIPAS/ENVISAT, OSIRIS/ODIN, AIM и др.). Ракетные *in situ* измерения незаменимы в исследовании данной области, но в силу чрезвычайно высокой стоимости систематические измерительные кампании осуществляются слишком редко. Дистанционные

измерения характеристик МНТ основаны на пассивном приеме излучения атмосферы в видимом, инфракрасном или микроволновом диапазонах. Поэтому они сопряжены, во-первых, с решением некорректных обратных задач ввиду того, что принимаемый сигнал является интегральным, приходящим с широкого диапазона высот, и, вообще говоря, зашумлен, во-вторых, с использованием дополнительных априорных приближений, о, например, фотохимическом и химическом равновесии некоторых малых газовых составляющих. Искажения, связанные с систематическими ошибками этих приближений или их полной некорректностью, могут существенно влиять на глобальные распределения измеряемых характеристик МНТ. В силу вышесказанного, развитие методов оценки систематических ошибок и проведение ревизии используемых приближений являются важными и актуальными задачами исследования МНТ.

Цели и задачи работы

Целью данной работы является развитие методов обработки результатов дистанционного зондирования нижней и средней атмосферы. Для достижения указанных целей был поставлен и решён ряд задач:

1. Валидация ряда современных моделей атмосферного поглощения в диапазоне 20–60 ГГц по данным одновременных микроволновых и радиозондовых измерений тропосферных профилей температуры и водяного пара.
2. Оценка качества сверхкраткосрочного прогноза грозы по данным пассивных микроволновых измерений тропосферных профилей температуры и водяного пара с помощью индексов конвективной неустойчивости атмосферы. Сравнение с результатами прогноза по данным радиозондовых измерений.
3. Разработка общего подхода для исследования применимости условия химического/фотохимического равновесия малых газовых составляющих атмосферы.
4. Исследование условия равновесия озона в ночное и дневное время на высотах МНТ, которое широко используется для восстановления пространственно-временных распределений ночных концентраций О и Н по данным ракетных и спутниковых измерений. Исследование выполнимости тройного фотохимического равновесия ОН, NO₂ и О₃ в дневное время суток.
5. Усовершенствование разработанного ранее метода статистической оценки качества одновременных измерений нескольких атмосферных компонент при условии их фотохимического равновесия.

Научная новизна

Все полученные результаты являются новыми. Отметим новизну основных из них:

Впервые предложена спектроскопическая модель, которая демонстрирует сравнительно небольшое смещение между измеренными и рассчитанными яркостными температурами в 5мм полосе собственного излучения атмосферного кислорода.

Впервые проведена оценка качества прогноза опасных метеорологических явлений по данным микроволновых измерений.

Впервые определены пространственно-временные зоны равновесия ночного озона и показано, что ранее предложенный критерий равновесия хорошо (как качественно, так и количественно) воспроизводит нижнюю границу области этого равновесия. Так же впервые показано, что дневное фотохимическое равновесие озона и совместное равновесие OH , HO_2 и O_3 выполняется с точностью не хуже, чем 3-4% во всей МНТ.

Впервые показано, что неучет реакции $\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$ в условии фотохимического равновесия дневного озона существенно проявляется в восстанавливаемых распределениях O , OH , HO_2 и скорости химического нагрева воздуха.

Впервые обнаружено, что в процедуре построения совместной апостериорной плотности вероятности нескольких атмосферных компонент при условии их равновесия есть неоднозначность, связанная с выбором способа предельного перехода от трехмерного вероятностного распределения к поверхностному. Впервые предложен предельный переход типа «одеяло», который приводит к наименьшим систематическим ошибкам метода статистической оценки качества одновременных измерений этих компонент.

Практическая значимость

Результаты валидации моделей атмосферного поглощения данными микроволновых и радиозондовых измерений указывают направление развития спектроскопических моделей, что в итоге приведет к минимизации ошибки восстановления термической структуры атмосферы.

Результаты исследования предсказательных характеристик индексов конвективной неустойчивости атмосферы позволяют расширить применение микроволновых профилометров для наукастинга опасных метеорологических явлений, что особенно актуально и экономически выгодно для работы аэропортов, организации различных социальных мероприятий и прочее. В целом, данный результат является одним из первых свидетельств того, что сравнительно дешевые, полностью автоматизированные, малогабаритные, не требующие постоянного обслуживания и рас-

ходных материалов современные микроволновые приборы, измеряющие профили параметров атмосферы с временным разрешением несколько минут, готовы для использования в качестве сетевого прибора на метеорологических станциях, осуществляющих ежедневный мониторинг атмосферы в интересах прогноза погоды.

Предложенный подход к исследованию применимости условия химического /фотохимического равновесия малых газовых составляющих атмосферы открывает широкий спектр возможностей разработки и последующего применения методов восстановления неизмеряемых или плохо измеряемых характеристик тропосферы и стратосферы по наземным и спутниковым данным дистанционного зондирования. Многочисленные результаты предшествующих зарубежных исследований, в которых условие равновесия ночного и дневного озона на высотах МНТ использовалось некорректным образом, подлежат пересмотру.

Проведенные теоретические разработки метода статистической оценки качества одновременных измерений нескольких атмосферных компонент полезны для развития других методов статистической обработки больших объемов данных дистанционного зондирования, использующих априорные ограничения в виде локальных связей между измеряемыми величинами.

Положения выносимые на защиту

1. Модель ECS (Energy Corrected Sudden) поглощения микроволнового излучения в атмосферном воздухе наилучшим образом соответствует натурным наблюдениям спектра собственного излучения атмосферы в частотном диапазоне 50-60 ГГц.
2. Качество сверхкраткосрочного прогноза грозы по данным пассивных микроволновых измерений профилей тропосферных характеристик с помощью индексов конвективной неустойчивости атмосферы соответствует или превышает качество прогноза по данным по данным радиозондовых измерений.
3. Получено аналитическое соотношение, определяющее положение пространственно-временной зоны равновесия ночного озона в области МНТ. Положение максимума измеряемой объемной скорости эмиссии возбужденного гидроксила можно использовать в качестве эмпирического индикатора положения нижней границы этой зоны.
4. Дневное фотохимическое равновесие озона и совместное равновесие OH , HO_2 и O_3 выполняется с точностью не хуже, чем 3-4% во всей МНТ.
5. Для корректного восстановления дневных распределений O , OH , HO_2 и скорости химического нагрева воздуха в мезосфере необходим учет реакции $\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$ в условии фотохимического равновесия дневного озона.

6. Существующий метод статистической оценки качества одновременных измерений нескольких атмосферных компонент при условии их фотохимического равновесия является неоднозначным с точки зрения выбора апостериорной плотности вероятности, что связано с парадоксом Бореля – Колмогорова. Предложенный в диссертации переход от трехмерного вероятностного распределения к двумерному приводит к наименьшим систематическим ошибкам данного метода.

Методы и степень достоверности результатов

Для решения задач работы применялись методы теории распространения излучения в атмосфере, анализа нелинейной динамики атмосферных фотохимических систем, решения некорректных обратных задач, формализм анализа ошибок. Применение методов сопряжено с активным использованием математического анализа, линейной алгебры и теории вероятностей. Реализации процедур восстановления и численное трехмерное моделирование сопряжены с использованием разнообразных численных методов, упомянутых в основном тексте диссертации. Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением признанных методов и оригинальных подходов, взаимно дополняющих друг друга. Адекватность используемых моделей продемонстрирована в большом количестве предшествующих работ. Результаты по теме диссертации опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах ИПФ РАН.

Апробация результатов

Данная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Ее результаты опубликованы в 11 ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах [A1–A11], обсуждались на семинарах ИПФ РАН, докладывались на многочисленных российских и международных конференциях: Генеральной Ассамблее Европейского союза наук о Земле (2014, 2016 гг., Вена, Австрия), 26-й Генеральной Ассамблее Международного Союза геодезии и геофизики IUGG (2015 г., Прага), 32-й IUGG Конференции по математической геофизике (2018 г., Нижний Новгород), Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (2011 г., Борок; 2012 г., Звенигород; 2013 г., Нижний Новгород; 2014 г., Борок; 2015 г., Шепси; 2016 г., Кстово; 2017 г., Борок), Научной школе «Нелинейные Волны» (2012, 2016, 2018 гг., Нижний Новгород), Всероссийской Откры-

той конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» (2018, 2019, 2020 и 2021 гг., Москва), 10-го Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (2016 г., Нижний Новгород), конференции молодых специалистов по проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (2013 г., Обнинск) и др.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор непосредственно занимался обработкой данных наземного и спутникового дистанционного зондирования, проводил численное и аналитическое исследование статистических методов обработки, осуществлял 3х мерное химико-транспортное моделирование и обрабатывал полученные результаты. В статьях [A2, A5, A8] вклад диссертанта был определяющим. В работах [A1, A3, A4, A9] вклад диссертанта заключался в результатах химико-транспортного моделирования и их обработке. В работах [A6, A10, A11] вклад диссертанта был равным с вкладом первого автора работ. В работе [A7] диссертант осуществлял обработку микроволновых и радиозондовых данных, вычисление индексов и препроцессинг для определения качества прогноза гроз.

Краткое содержание диссертации

Во введении освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновываются актуальность исследований по теме диссертации и их практическая значимость, формулируются цели и задачи работы и кратко излагается ее содержание.

Первая глава посвящена развитию методов обработки данных микроволнового пассивного зондирования нижней атмосферы.

В **разделе 1.1** приведено описание микроволнового профилометра RPG-НАТPRO производства Radiometer Physics GmbH, на основе данных которого получены результаты первой главы. Прибор, установленный в наблюдательном пункте ИПФ РАН, осуществляет непрерывные наблюдения с конца 2013 года. Он измеряет яркостные температуры неба в диапазонах 22–32 ГГц и 51-59 ГГц, захватывающих склон линии водяного пара и полосы поглощения молекулярного кислорода. Спектр излучения анализируется в 7 спектральных каналах в каждом из диапазонов. По радиометрическим данным определяются (восстанавливаются) высотные профили температуры и влажности и другие атмосферные характеристики. Восстановление производится посредством регрессионных моделей,

созданных производителем на основе результатов симуляций¹ яркостных температур на большом ансамбле радиозондовых данных (см. [1]).

В разделе 1.2 производится сравнение различных моделей поглощения атмосферного воздуха на основе длительного ряда одновременных микроволновых и радиозондовых измерений. По радиозондовым данным (станция Нижний Новгород №27459 находится на удалении 7 км от наблюдательного пункта ИПФ РАН) проводятся симуляции микроволнового зондирования прибором НАТPRO. При этом используются модели поглощения атмосферного воздуха, обозначаемые нами как МРМ1, МРМ2, МРМ2а и ECS (см. приложение А диссертации и [7–9]). Модели отличаются исключительно поглощением в полосе молекулярного кислорода. Сравнение результатов симуляций (яркостных температур) с соответствующими (по времени) реальными измерениями микроволнового профилометра позволяет определить, какая из моделей поглощения обеспечивает получение наиболее близких к реальности результатов.

Симуляции проводились посредством вычисления следующего выражения, являющегося решением уравнения распространения излучения по лучу в приближении Рэлея – Джинса:

$$F(\nu, \xi) = T_{b0}(\nu) \exp(-\tau(z_\infty, \nu, \xi)) + \int_{z_0}^{z_\infty} \frac{\alpha(\nu, z)}{\sin \xi} \cdot T(z) \cdot \exp(-\tau(z, \nu, \xi)) dz, \quad (1)$$

$$\tau(z, \nu, \xi) = \int_{z_0}^z \frac{\alpha(\nu, z')}{\sin \xi} dz' \quad T_{b0}(\nu) = \frac{h\nu}{2k} \left(\frac{\exp(h\nu/kT_0) + 1}{\exp(h\nu/kT_0) - 1} \right)$$

где $T_0 = 2,725\text{К}$ – эффективная яркостная температура космического фонового микроволнового излучения, k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, ξ – угол возвышения, α – коэффициент поглощения атмосферного воздуха, зависящий от атмосферных характеристик (температуры, давления и состава воздуха). Ввиду отсутствия сведений о структуре облачности, мы вынуждены ограничиться случаями ясной погоды. Наличие облаков определялось по значениям интегрального содержания жидкой воды в атмосфере (LWP), определяемого по измерениям НАТPRO (подробнее см. [A8] и [10]). Поскольку симуляции чувствительны к состоянию атмосферы на высотах 10–15 км, рассматривались пуски радиозондов, достигающие 15км. Выше 15 км использовались атмосферные характеристики из модели NRLMSISE-00 [11].

Основной результат раздела представлен на рис. 1: средние и среднеквадратичные значения разности между измеренными и симулированными яркостными температурами при зондировании в зенит. Симуляции адекватны по крайней мере потому, что среднеквадратичные разности на

¹Здесь и далее будем называть вычисления спектров собственного излучения атмосферы с помощью модели переноса излучения, включающей модель поглощения атмосферного воздуха, симуляциями.

рис. 1 значительно меньше общей вариацией яркостных температур неба. Средние разности на рисунке 1 превосходят абсолютную точность измерений НАТПРО (0,6 К). Симуляции на основе модели ECS оказываются наиболее близкими к измерениям.

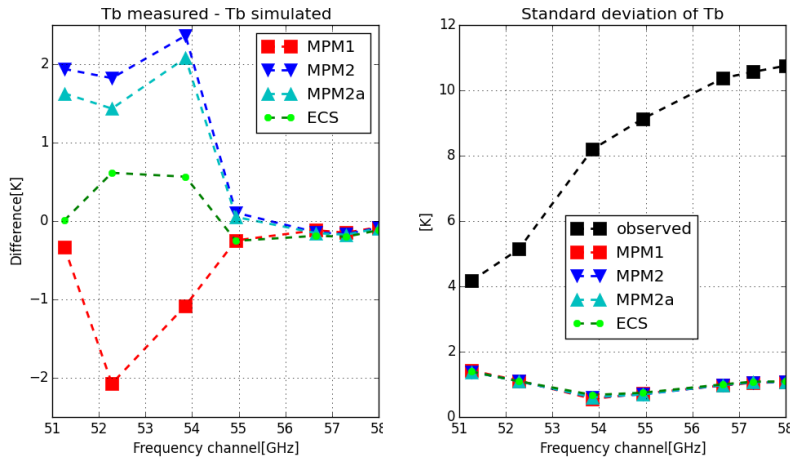


Рис. 1: Средние (слева) и среднеквадратичные (справа) значения разности между измеренными и симулированными яркостными температурами в условиях ясного неба. Черными маркерами справа обозначена общая вариация яркостной температуры в наблюдениях. Симуляции используют различные модели поглощения: MPM1, MPM2, MPM2a и ECS.

Значительная часть раздела посвящена тщательному анализу бюджета ошибок. Оценены ошибки, связанные с конечной шириной спектральных каналов, и диаграммы направленности антенны. На основе сингулярного анализа проиллюстрировано, что средние значения на рис. 1 не могут быть вызваны исключительно систематической ошибкой в профиле температуры. Проведен анализ измерений и симуляций в режиме сканирования по углу. В результате делается вывод о спектроскопической природе наблюдаемой разности между симуляциями и наблюдениями, а также о наибольшей адекватности модели ECS. Результаты раздела опубликованы в [A8].

Раздел 1.3 посвящен вычислению индексов конвективной неустойчивости атмосферы на основе микроволновых данных НАТПРО и их последующему сравнению с аналогичными индексами, рассчитанных на основе используемых в настоящее время для этой цели радиозондовых данных.

Из измерений высотных профилей температуры и влажности НАТПРО

и радиозондовых данных (станция Нижний Новгород, №27459) за 2014–2018 гг. была составлена база данных одновременных измерений соответствующих умеренной облачности ($LWP < 400 \text{ г/м}^2$) в конвективный сезон (с мая по август). Для каждого случая одновременных измерений были рассчитаны 15 индексов по формулам, представленным в [12–14]. Рассматривались следующие индексы: CAPE (Convective Available Potential Energy), MUCAPE (Maximum Unstable CAPE), CIN (Convective Inhibition), JI (Jefferson Index), KI (K index), KOI (KO index), LI (Lifted Index), MDPI (Microburst Day Potential Index), FT (fog threat index), ShowI (Showalter Index), SI (S index, STT), TI (Thompson index), TT (Total Totals index), TQ (TQ index), и EPI (Equivalent Potential Instability). В результате обработки одного случая одновременных наблюдений получаются две группы из 15 индексов: по микроволновым и по радиозондовым данным. По результатам измерений флюксметров BOLTEK EFM-100 были определены точные моменты начала гроз, соответствующие первой молниевой вспышке.

Индекс указывает на возможную грозу, если его значение оказывается выше (или ниже) определенного порога. Пороговые значения выбираются индивидуально для каждой географической локации. Для того, чтобы оценить качество прогноза с заданной заблаговременностью (12 часов) для индекса с заданным порогом, необходимо классифицировать все рассматриваемые случаи, разделив их на четыре категории согласно таблице сопряженности таб.1. Элементы таблицы 1 (a, b, c и d) обозначают количество случаев в каждой категории. Отметим что значения a, b, c и d зависят от порогового значения индекса. На основе таблицы 1 вычисляются прогностические характеристики TSS (True Skill Statistic) и HSS (Heidke Skill Score):

Таблица 1: Таблица сопряженности

		Наблюдения	
		есть	нет
Прогноз	будет	a -предсказанное событие	b -ложная тревога
	не будет	c -неожиданное событие	d -ожидаемое отсутствие события

$$TSS = \frac{a}{a+c} - \frac{b}{b+d} = \frac{ad - cb}{(a+c)(b+d)}. \quad (2)$$

$$HSS = \frac{a+d-R}{a+b+c+d-R}, \quad (3)$$

где

$$R = \frac{(a+b)(a+c) + (c+d)(b+d)}{a+b+c+d}. \quad (4)$$

Величина TSS равна разнице между оценками вероятности обнаружения (предсказания) и вероятности ложного обнаружения, величина HSS характеризует долю успешных предсказаний (как наличия явления, так и отсутствия) с поправкой на (оценочное) количество правильных случайных прогнозов R (см. [4]). Пороговые значения находятся путем максимизации TSS и HSS . В результате оказывается, что индексы посчитанные по микроволновым данным имеют более высокие максимальные TSS и HSS , чем те же индексы вычисленные по радиозондовым данным. Результаты раздела опубликованы в [A7].

Вторая глава посвящена исследованию фотохимического равновесия малых примесей мезосферы – нижней термосферы в контексте их практического использования в спутниковом зондировании. Рассматриваются дневной и ночной озон, а также тройное равновесие дневных O_3 , OH и HO_2 .

В разделе 2.1 приводится обзор использования предположения о химическом /фотохимическом равновесии компонент в спутниковом зондировании мезосферы – нижней термосферы.

В разделе 2.2 описана методика исследования фотохимического равновесия на основе трехмерного химико-транспортного моделирования, используемая в главе 2. В данном случае равновесие понимается в локальном смысле, как равенство истоков и стоков одной из компонент. Эволюцию одной компоненты любой фотохимической системы можно представить как релаксацию к мгновенному состоянию равновесия, изменяющемуся с течением времени. Время релаксации (оно же – время жизни) тоже зависит от времени. Если характерное время изменения состояния равновесия меньше, чем время релаксации, то компонента скорее всего не будет находиться в малой окрестности состояния фотохимического равновесия. Это позволяет формализовать критерий фотохимического равновесия компоненты. Поскольку для практических целей нужно оценить точность выполнения фотохимического равновесия в широком диапазоне условий, соответствующих реальной мезосфере и с учетом влияния процессов переноса, оценка производится на основе результатов химико-транспортного моделирования. В результате методика сводится к следующему: (1) определение с помощью трехмерного химико-транспортного моделирования пространственно-временных зон, где эволюция интересующей нас компоненты происходит вблизи локального устойчивого положения равновесия; (2) построение количественного критерия, позволяющего определять границы зон равновесия; (3) проверка с помощью химико-транспортного моделирования соответствия критерия границам пространственно-временных зон равновесия.

В разделе 2.3 содержится описание химико-транспортной модели, используемой в главе 2. Результаты моделирования вошли в работы [A1–A5, A9]. Модель (см. [15]) состоит из фотохимического и транспорт-

ного блоков. Химический блок описывает поведение 17 компонент и включает 63 фотохимических реакций между ними. Часть реакций, упоминаемых далее по тексту, представлена в таблице 2 с соответствующими обозначениями. Транспортный блок осуществляет расчет адвекционного переноса и вертикальной (турбулентной и молекулярной) диффузии. В качестве входных данных (эволюция полей скорости ветра, температуры и пр.) для него используются результаты расчетов с помощью моделей общей циркуляции атмосферы СОММА-ІАР [16] или СМАМ [17].

Таблица 2: Список упоминаемых ниже реакций химико-транспортной модели с обозначениями.

k_{12}	$O+O_2+M \rightarrow O_3+M$	k_{20}	$H+O_2+M \rightarrow HO_2+M$
k_{13}	$O+O_3 \rightarrow O_2+O_2$	k_{21}	$H+O_3 \rightarrow OH+O_2$
k_{14}	$H+HO_2 \rightarrow 2OH$	f_1	$OH+O_3 \rightarrow O_2+HO_2$
k_{15}	$H+HO_2 \rightarrow H_2O+O$	f_2	$HO_2+O_3 \rightarrow OH+2O_2$
k_{16}	$H+HO_2 \rightarrow H_2+O_2$	g_1	$NO_2+O_3 \rightarrow NO_3+O_2$
k_{17}	$OH+O \rightarrow H+O_2$	g_{10}	$O_3+h\nu \rightarrow O_2+O$
k_{18}	$HO_2+O \rightarrow OH+O_2$	g_{11}	$O_3+h\nu \rightarrow O_2+O(^1D)$

Раздел 2.4 посвящен исследованию химического равновесия ночного озона, являющегося основополагающим в методе определения O по спутниковым данным SABER /TIMED [18]. Работа [18] учитывает в балансе ночного озона всего две реакции k_{12} и k_{21} (см. таб. 2). В этом случае равновесие O_3 предполагает:

$$k_{21} \cdot H \cdot O_3 = k_{12} \cdot O \cdot O_2 \cdot M. \quad (5)$$

где M – концентрация воздуха. Температура и давление известны из измерений SABER в ИК диапазоне, поэтому температурозависимые коэффициенты k_{12} , k_{21} и концентрации O_2 , M известны. Промежуточным продуктом реакции k_{21} является OH^* (возбужденный OH). Измерения интенсивности его свечения на длине волны 2мкм, что соответствует переходам между энергетическими уровнями $\nu 9 \rightarrow \nu 7$ и $\nu 8 \rightarrow \nu 6$, позволяют определить объемную плотность излучения $VER_{2\mu m}$, которую можно связать с левой частью (5) посредством модели свечения A :

$$VER_{2\mu m} = k_{21} \cdot H \cdot O_3 \cdot A(T, O_2, N_2, O), \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6), можно найти O .

Проведено исследование выполнения условия (5) химического равновесия ночного O_3 . На основе химико-транспортного моделирования была исследована эволюция отношения O_3 к его равновесному значению O_{3eq} . В результате было показано, что в области МНТ предположение

(5) выполняется с точностью до 10% на высотах более 82–87 км. Эволюция условной границы равновесности, вблизи которой выполняется (с точностью 10%) условие (5), нетривиальна и имеет явную сезонную зависимость. Результаты исследования границы равновесности с использованием различных вариантов химико-транспортной модели стали основой публикаций [A2, A3].

В разделе 2.5 изложены результаты поиска критериев химического равновесия ночного озона, основанных на имеющихся данных измерений.

С помощью результатов численного моделирования в [A2] было показано, что граница равновесности ночного озона коррелирует с положением максимума концентрации возбужденного гидроксила (OH^*). Таким образом положение максимума свечения OH^* можно использовать как индикатор границы, определяемый по данным SABER.

В работе [A3] согласно методике, изложенной в разделе 2.2, был найден аналитический критерий равновесности ночного O_{3eq} :

$$Cr = \frac{\tau_{\text{O}_3}}{\tau_{\text{O}_{3eq}}} = 2 \frac{k_{12} k_{20} \cdot M^2 \cdot \text{O}_2^2}{k_{21}^2 \cdot \text{H} \cdot \text{O}_3} \cdot \left(1 - \frac{k_{15} + k_{16}}{k_{18}} \right) < 1. \quad (7)$$

Примечательно, что (7) может быть вычислено исключительно из данных SABER. С помощью трехмерного моделирования в [A3] было продемонстрировано, что высота, соответствующая критерию $Cr = 0,1$, хорошо описывает границу равновесности. Исследование поведения границы на основе данных SABER приведено в [A6].

В разделе 2.6 указано, что способ представления результатов в виде зональных средних, используемый во второй главе, обладает определенными недостатками. Линии уровня критерия могут не совпадать с границей равновесности для зональных средних, в то время как локально (в заданной географической точке) критерий хорошо определяет выполнимость химического равновесия ночного O_3 .

Раздел 2.7 посвящен исследованию фотохимического равновесия дневного озона в задаче определения дневного O прибором SABER / TIMED [18]. В работе [18] равновесие дневного O_3 сводится к балансу производства озона (k_{12}) и его фотодиссоциации (g_{10} и g_{11}):

$$(g_{10} + g_{11}) \cdot \text{O}_3 = k_{12} \cdot M \cdot \text{O}_2 \cdot \text{O} \quad (8)$$

Аналогично случаю с ночным озоном (раздел 2.4) температурозависимый коэффициент k_{12} и концентрации O_2 , M известны. Коэффициенты фотодиссоциации g_{10} и g_{11} вычисляются по измерениям спутника SORCE [19]. В итоге измерения O_3 на 9,6 мкм позволяют из (8) определить O . На основе численного моделирования в [A1] было определено, что дневной озон с высокой точностью соответствует своему равновесному значению, если учитывать отсутствующий в (8) сток за счет реакции с H (k_{21}).

Пренебрежение стоком за счет реакции k_{21} не всегда правомерно. Оценка на основе моделирования показывает, что в среднем вклад k_{21} в гибель дневного O_3 может составлять до 70% от вклада фотодиссоциации.

Далее в разделе предложен способ определения O и H , учитывающий реакцию k_{21} в фотохимическом равновесии озона:

$$(g_{10} + g_{11} + k_{21} \cdot H) \cdot O_3 = k_{12} \cdot M \cdot O_2 \cdot O \quad (9)$$

Используя измерения $VER_{2\mu m}$ и модель свечения OH^* (6) можно, решая систему двух уравнений, определить O и H . Полученные концентрации O , H , O_3 дают возможность определить OH и HO_2 из предположении о фотохимическом равновесии этих компонент. По O , H , O_3 , OH и HO_2 в итоге можно оценить одну из важнейших характеристик области МНТ – скорость ее химического нагрева (СХН) за счет экзотермических реакций k_{11} , k_{12} , k_{13} , k_{17} , k_{18} , k_{21} , что и было сделано. В результате в работах [A10, A11] были обработаны данные SABER с 2003 по 2015 гг.

Определение OH , HO_2 и СХН возможно из исходных (полученных на основе (8)) результатов SABER, поэтому далее в разделе произведено сравнение результатов отыскания величин O , H , O_3 , OH , HO_2 и СХН с учетом реакции k_{21} в фотохимическом равновесии дневного O_3 и без. Неучет k_{21} приводит к существенному (до ~50–70%) систематическому занижению среднемесячных и среднегодовых концентраций O на высотах 75–90 км, завьшает (до ~50–85%) значения концентраций OH и HO_2 и занижает (до ~35–40%) скорость химического нагрева МНТ.

В разделе 2.8 проведено исследование совместного фотохимического равновесия дневных O_3 , OH и HO_2 на основе трехмерного химико-транспортного моделирования. Путем анализа системы уравнений, описывающих одновременное фотохимическое равновесие O_3 , OH и HO_2 , было установлено, что концентрации этих компонент должны удовлетворять следующему алгебраическому соотношению:

$$F(OH, HO_2, O_3) = \left(\frac{k_{20}MO_2}{k_{20}MO_2 + k_{21}O_3 + 2k_{14}HO_2} + \frac{k_{12}f_1MO_2}{(g_{10} + g_{11})k_{17}} \right) \frac{k_{17}OH}{k_{18}HO_2} = 1 \quad (10)$$

Следует отметить, что связь (10) зависит от температуры, зенитного угла и активности солнца. Ей удовлетворяют только мгновенные концентрации компонент. Для средних (O_3 , OH и HO_2) по времени условие (10) не выполняется. По результатам химико-транспортного моделирования показано, что соотношение (10) выполняется с точностью не хуже 4% в диапазоне высот от 50 до 100км.

Третья глава посвящена развитию метода статистической оценки качества одновременных измерений нескольких атмосферных компонент

при условии их фотохимического равновесия, предложенного в [A4]. Анализируются математические основы метода и предлагаются (см. [A5]) практические рекомендации, нивелирующие недостатки метода.

В разделе 3.1 описан метод статистической оценки качества данных дневных измерений O_3 , OH и HO_2 [A4], основанный на учете фотохимической связи между компонентами (10), которая исследуется в разделе 2.8. Компоненты O_3 , OH и HO_2 независимо измеряются прибором MLS/Aura путем пассивного микроволнового зондирования. На основе того, насколько результаты MLS/Aura удовлетворяют (10), делается вывод о качестве данных одновременных измерений O_3 , OH и HO_2 . В силу больших ошибок единичных измерений, метод основан на вероятностном рассмотрении результатов измерений. По сути он представляет собой метод оптимальной оценки [20] с тривиальной моделью прямой задачи (тождественный оператор) и очень необычными априорными ограничениями. Обозначим результат измерений OH , HO_2 и O_3 MLS/Aura как $\vec{x} = \{HO_2^m, O_3^m, OH^m\}$. Обозначим возможные «истинные» концентрации компонент $\vec{u} = \{HO_2^{ret}, O_3^{ret}, OH^{ret}\}$. В терминологии [20] \vec{x} называется вектором измерений, \vec{u} – вектором состояния. Шум измерений предполагается аддитивным и гауссовым, то есть $\vec{x} = \vec{u} + \vec{\xi}$, где $\vec{\xi}$ подчиняется распределению

$$w(\vec{\xi}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \prod_i \sigma_i} \cdot \exp\left(-\sum_i \frac{\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (11)$$

В (11) σ_i обозначают соответствующие среднеквадратичные отклонения ошибок измерения концентраций HO_2 , O_3 и OH : $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\} \equiv \{\sigma_{HO_2}, \sigma_{O_3}, \sigma_{OH}\}$. Компоненты \vec{u} должны удовлетворять фотохимической связи (10). Учтем это, введя априорную плотность распределения $\Psi(\vec{u})$:

$$\Psi(\vec{u}) = \Psi_{OH}(\vec{u}) = \delta[u_3 - G(u_1, u_2)], \quad (12)$$

где $\delta(u)$ – дельта функция, а функция $G(u_1, u_2)$ получена из (10). Условная вероятность распределения истинных концентраций \vec{u} при условии (в случае) наблюдений \vec{x} (согласно теореме Байеса):

$$f(\vec{u}|\vec{x}) \propto \Psi(\vec{u}) \cdot w(\vec{x} - \vec{u}), \quad (13)$$

Подставляя (11) и (12) в (13) и интегрируя по u_3 , получаем апостериорную плотность вероятности

$$f_{OH}(u_1, u_2|\vec{x}) \propto \exp\left[-\frac{(x_1 - u_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(x_2 - u_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \cdot \exp\left\{-\frac{[x_3 - G(u_1, u_2)]^2}{2\sigma_3^2}\right\}, \quad (14)$$

Средние и другие моменты данного распределения находятся по выборке (u_1, u_2) , полученной в результате семплирования плотности вероятности (14) с применением алгоритма Метрополиса – Гастингса [21]. Применяя к полученной выборке функцию G , получаем выборку по u_3 . Таким образом, в результате применения метода к одному одновременному измерению NO_2 , O_3 и OH получаем выборку возможных истинных значений этих компонент. Обработывая большие объемы данных MLS/Aura, можно исследовать систематическую разницу между средними от результата применения метода и средними от исходных данных, и на основании этого делать вывод о наличии систематических ошибок в измерениях прибора.

В разделе 3.2 описаны математические нюансы, затрудняющие применение метода, в частности описана неоднозначность, связанная со способом построения условной плотности вероятности на множестве меры нуль (см. парадокс Бореля – Колмогорова [22]). Во-первых, из теории и практики применения статистических методов восстановления характеристик атмосферы по данным дистанционного зондирования (см. [20]) известно, что введение априорного ограничения всегда вызывает смещение результата восстановления, которое может быть довольно большим в случае существенной ошибки измеренных данных. Теоретически возможно выбрать априорную вероятность так, что в среднем получается среднее по распределению истинной величины. Для этого необходимо, чтобы априорное распределение в точности совпадало с истинным, что нереализуемо с практической точки зрения в задаче оценки качества данных. Во-вторых, наблюдается неоднозначность выбора априорной функции распределения. При альтернативном выборе, например, выражая $u_2 = Z(u_1, u_3)$ и проделывая манипуляции раздела 3.1, получим выражение аналогичное (14):

$$f_{\text{O}_3}(u_1, u_3 | \vec{x}) \propto \exp \left[-\frac{(x_1 - u_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] \cdot \exp \left\{ -\frac{[x_2 - Z(u_1, u_3)]^2}{2\sigma_2^2} \right\} \cdot \exp \left[-\frac{(x_3 - u_3)^2}{2\sigma_3^2} \right], \quad (15)$$

которое описывает существенно другую плотность вероятности, что можно показать с помощью замены переменных $(u_1, u_3) \rightarrow (u_1, u_2)$.

Выражение (10) описывает в трехмерном пространстве векторов \vec{u} двухмерную поверхность L , которая является множеством меры нуль. Метод, описанный в разделе 3.1, анализирует условное распределение случайной величины (с функцией распределения $w(\vec{x} - \vec{u})$) на поверхности L . Известно, что условное распределение на множестве меры нуль можно ввести бесконечным количеством способов. Определение связано с предельным переходом от множества ненулевой меры к нулевой (от объемного слоя к поверхности). Каждый выбор априорной плотности ве-

роятности аналогичный (12), соответствует своему предельному переходу. В [А5] предложен альтернативный способ, соответствующий переходу, названному в диссертации «одеяло»:

$$\Psi_{\text{ОН}}^{\text{patch}}(\vec{u}) = \delta[u_3 - G(u_1, u_2)] \sqrt{1 + \left(\frac{\partial G}{\partial u_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial u_2}\right)^2}. \quad (16)$$

В разделе 3.3 произведена оценка систематических ошибок метода на симулированных данных. Для этого из результатов химико-транспортного моделирования были взяты данные в точках соответствующих орбите спутника Timed. Для этих данных соотношение (10) выполнялось точно. Далее добавлялся шум, соответствующий реальным измерениям MLS. Таким образом симулировались идеальные (без систематических ошибок) измерения спутника. К этим данным был применен метод оценки качества, описанный в разделе 3.1. В результате метод действительно показал отклонения, несмотря на идеальность данных. Систематические ошибки метода сильно зависят от выбора априорной функции распределения. Показано, что систематическая ошибка предложенного метода «одеяло» меньше, чем при использовании других методов.

В разделе 3.4 произведена статистическая оценка качества одновременных спутниковых измерений O_3 , ОН и НО_2 прибором MLS на спутнике Aura с использованием различных способов построения апостериорной плотности вероятности. Сопоставление средних от результатов на идеальных, симулированных данных (раздел 3.3) с результатами применения метода к реальным измерениям MLS/Aura выявляет, какие из наблюдаемых отклонений между средними можно отнести к систематическим ошибкам метода, а какие связаны со систематическими ошибками измерений. В результате выявлены значительные систематические ошибки в измерениях НО_2 на уровнях давления, близких к 0,1 мБар.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. На основании многолетних одновременных микроволновых и радиозондовых наблюдений над Нижним Новгородом, проведен анализ соответствия между наблюдаемыми микроволновыми спектрами яркостной температуры в диапазоне 20–60 ГГц и результатами расчета этих спектров с помощью ряда современных моделей поглощения микроволнового излучения в атмосфере. В случае зондирования в зенит обнаружено, что: (1) все используемые варианты модели MPM (Microwave Propagation Model) дают существенное (до 2 К)

систематическое смещение спектров яркостной температуры в диапазоне 51–54 ГГц; (2) модель поглощения атмосферного воздуха, построенная на основе формализма ECS (Energy Corrected Sudden), наилучшим образом соответствует натурным наблюдениям в этом диапазоне: максимальное смещение между измеренными и рассчитанными спектрами яркостных температур составляет не более 0,6 К.

2. Проведен анализ прогноза грозовых событий над Нижним Новгородом в 2014–2018 гг. по 15 используемых в настоящее время прогностическим индексам конвективной неустойчивости атмосферы, определенным по данным пассивных микроволновых измерений тропосферных профилей температуры и водяного пара и по данным радиозондовых измерений этих же характеристик атмосферы на ближайшей метеорологической станции Росгидромета. Для каждого индекса проведена сравнительная оценка качества прогнозирования грозы с заблаговременностью 12 часов. Установлено, что для всех индексов вероятность правильного прогноза грозы по микроволновым данным выше, чем по радиозондовым.
3. Разработан общий подход к исследованию применимости условия химического/фотохимического равновесия малых газовых составляющих атмосферы, основанный на анализе нелинейной мультимасштабной динамики трехмерных химико-транспортных моделей. Он включает в себя: (1) определение с помощью данных моделей пространственно-временных зон, где эволюция интересующей компоненты происходит вблизи мгновенного устойчивого положения равновесия; (2) вывод приближенных аналитических соотношений, определяющих положение границы зон равновесия на основании имеющихся данных измерений и позволяющих контролировать ошибки применения условия равновесия для восстановления неизмеряемых атмосферных характеристик; (3) проверку соответствия найденных приближенных соотношений границам пространственно-временных зон равновесия с помощью трехмерного химико-транспортного моделирования.
4. С помощью трехмерного химико-транспортного моделирования области МНТ с использованием различных современных моделей: (1) определены пространственно-временные зоны равновесия озона в ночное время; (2) показано, что полученные условия равновесия хорошо (как качественно, так и количественно) воспроизводит нижнюю границу зоны равновесия, положение которой варьируется в зависимости от времени года и широты, и которая, в свою очередь, коррелирует с положением максимума объемной скорости эмиссии возбужденного гидроксила, измеряемой современными спутниковыми приборами; (3) продемонстрировано, что в дневное время условия

фотохимического равновесия озона и совместного равновесия OH , HO_2 и O_3 выполняются с точностью не хуже, чем 3–4% во всей мезосфере – нижней термосфере.

5. С помощью трехмерного химико-транспортного моделирования и обработки данных многолетних спутниковых измерений SABER/TIMED проведен анализ качества восстановления дневных распределений O , H , OH , HO_2 и скорости химического нагрева на высотах МНТ с помощью используемого в настоящее время приближенного условия фотохимического равновесия дневного озона, учитывающего химический сток этой компоненты только за счет фотодиссоциации. Показано, что (1) данное приближенное условие обеспечивает восстановление высотного распределения концентрации H с точностью не хуже 10%; (2) приводит к существенному (до ~50–70%) систематическому занижению среднемесячных и среднегодовых концентраций O на высотах 75–90 км; (3) завышает (до ~50–85%) значения концентраций OH и HO_2 и занижает (до ~35–40%) скорость химического нагрева МНТ; (4) учет дополнительного стока озона за счет реакции $\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$ обеспечивает корректное восстановление как распределений концентраций всех перечисленных малых газовых составляющих, так и скорости химического нагрева области МНТ.
6. Проведено усовершенствование метода статистической оценки качества одновременных измерений нескольких атмосферных компонент при условии их фотохимического равновесия на примере данных измерений OH , HO_2 и O_3 на высотах мезосферы. Обнаружено, что в процедуре построения совместной апостериорной плотности вероятности этих величин есть неоднозначность, связанная с множественностью возможных способов предельного перехода от трехмерного вероятностного распределения к двумерному, которая существенно влияет на статистические средние и приводит к неизбежной систематической ошибке. Тестирование на искусственно зашумленных модельных данных OH , HO_2 и O_3 , имитирующих идеальные (несмещенные) измерения, показало, что выбор предложенного в диссертации предельного перехода типа «одеяло» приводит к наименьшим систематическим ошибкам метода. Продемонстрировано, что вертикальные распределения концентрации HO_2 , полученные в предшествующих работах на основании данных спутниковых измерений MLS/Aura с помощью условия тройного равновесия, содержат систематическое смещение, значительно превышающее погрешность данного метода, что приводит, в частности, к существенной ошибке в определении положения максимума концентрации этой компоненты на высотах мезосферы.

Список статей по теме диссертации

- [A1] Kulikov M. Y., Belikovich M. V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Ermakova T. S., Nechaev A. A., Feigin A. M. Daytime ozone loss term in the mesopause region // *Annales Geophysicae*. — 2017. — Vol. 35, no. 3. — Pp. 677–682. — URL: <https://angeo.copernicus.org/articles/35/677/2017/>.
- [A2] Belikovich M. V., Kulikov M. Yu., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Ermakova T. S., Nechaev A. A., Feigin A. M. Ozone chemical equilibrium in the extended mesopause under the nighttime conditions // *Advances in Space Research*. — 2018. — Vol. 61, no. 1. — Pp. 426–432. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117717307317>.
- [A3] Kulikov M. Yu., Belikovich M. V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Ermakova T. S., Nechaev A. A., Feigin A. M. Nighttime Ozone Chemical Equilibrium in the Mesopause Region // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2018. — Vol. 123, no. 6. — Pp. 3228–3242. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JD026717>.
- [A4] Kulikov M. Y., Nechaev A. A., Belikovich M. V., Ermakova T. S., Feigin A. M. Technical note: Evaluation of the simultaneous measurements of mesospheric OH, HO₂, and O₃ under a photochemical equilibrium assumption – a statistical approach // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2018. — Vol. 18, no. 10. — Pp. 7453–7471. — URL: <https://acp.copernicus.org/articles/18/7453/2018/>.
- [A5] Беликович М. В., Куликов М. Ю., Нечаев А. А., Фейгин А. М. Оценка качества измерений концентраций малых примесей атмосферы: априорные статистические ограничения, основанные на фотохимическом моделировании // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. — 2018. — Vol. 61, no. 8-9. — Pp. 645–661.
- [A6] Kulikov M. Yu., Nechaev A. A., Belikovich M. V., Vorobeva E. V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Feigin A. M. Boundary of Nighttime Ozone Chemical Equilibrium in the Mesopause Region From SABER Data: Implications for Derivation of Atomic Oxygen and Atomic Hydrogen // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46, no. 2. — Pp. 997–1004. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018GL080364>.
- [A7] Kulikov M. Yu., Belikovich M. V., Skalyga N. K., Shatalina M. V., Dementyeva S. O., Ryskin V. G., Shvetsov A. A., Krasil'nikov A. A., Serov E. A., Feigin A. M. Skills of Thunderstorm Prediction by Convective Indices over a Metropolitan Area: Comparison of Microwave and Radiosonde Data // *Remote Sensing*. — 2020. — Vol. 12, no. 4. — URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/4/604>.

- [A8] *Belikovich M. V., Kulikov M. Yu., Makarov D. S., Skalyga N. K., Ryskin V. G., Shvetsov A. A., Krasil'nikov A. A., Dementyeva S. O., Serov E. A., Feigin A. M.* Long-Term Observations of Microwave Brightness Temperatures over a Metropolitan Area: Comparison of Radiometric Data and Spectra Simulated with the Use of Radiosonde Measurements // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13, no. 11. — URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/11/2061>.
- [A9] *Kulikov M. Yu., Belikovich M. V., Feigin A. M.* The 2-Day Photochemical Oscillations in the Mesopause Region: The First Experimental Evidence? // *Geophysical Research Letters*. — 2021. — Vol. 48, no. 9. — P. e2021GL092795. — e2021GL092795 2021GL092795. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021GL092795>.
- [A10] *Kulikov M. Yu., Belikovich M. V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Feigin A. M.* Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO₂, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction $H + O_3 \rightarrow O_2 + OH$ in the ozone balance // *Advances in Space Research*. — 2022. — Vol. 69, no. 9. — Pp. 3362–3373. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117722001004>.
- [A11] *Kulikov M. Yu., Belikovich M. V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Feigin A. M.* The revised method for retrieving daytime distributions of atomic oxygen and odd-hydrogens in the mesopause region from satellite observations // *Earth, Planets and Space*. — 2022. — Mar. — Vol. 74, no. 1. — P. 44. — URL: <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01603-8>.

Список цитированной литературы

- [1] *Löhnert U., Maier O.* Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payerne: prospects and challenges // *Atmospheric Measurement Techniques*. — 2012. — Vol. 5, no. 5. — Pp. 1121–1134. — URL: <https://amt.copernicus.org/articles/5/1121/2012/>.
- [2] *Cimini D., Rosenkranz P. W., Tretyakov M. Y. et al.* Uncertainty of atmospheric microwave absorption model: impact on ground-based radiometer simulations and retrievals // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2018. — Vol. 18, no. 20. — Pp. 15231–15259. — URL: <https://acp.copernicus.org/articles/18/15231/2018/>.
- [3] *Andersson T., Andersson M., Jacobsson C., Nilsson S.* Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden //

- Meteorological Magazine*. — 1989. — Vol. 118, no. 1404. — Pp. 141–146.
- [4] *Haklander Alwin J., Van Delden Aarnout*. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands // *Atmospheric Research*. — 2003. — Vol. 67-68. — Pp. 273–299. — European Conference on Severe Storms 2002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809503000565>.
- [5] *Golitsyn G. S., Semenov A. I., Shefov N. N. et al.* Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere // *Geophysical Research Letters*. — 1996. — Vol. 23, no. 14. — Pp. 1741–1744. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96GL01592>.
- [6] *NDMC*. NDMC Mission Statement. — <https://ndmc.dlr.de/>. — 2012. — [Online; accessed 10-December-2021].
- [7] *Rosenkranz P.W.* Line-by-Line Microwave Radiative Transfer (Non-Scattering). — Remote Sens. Code Library http://cetemps.aquila.infn.it/mwrnet/lblmrt_ns.html. — (Accessed on 8 April 2021).
- [8] *Makarov Dmitriy S., Tretyakov Mikhail Yu., Rosenkranz Philip W.* Revision of the 60-GHz atmospheric oxygen absorption band models for practical use // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2020. — Vol. 243. — P. 106798. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002240731930576X>.
- [9] *Makarov D.S., Tretyakov M.Yu., Boulet C.* Line mixing in the 60-GHz atmospheric oxygen band: Comparison of the MPM and ECS model // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2013. — Vol. 124. — Pp. 1–10. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407313000745>.
- [10] *Turner David D., Clough Shepard A., Liljegren James C. et al.* Retrieving Liquid Water Path and Precipitable Water Vapor From the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Microwave Radiometers // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2007. — Vol. 45, no. 11. — Pp. 3680–3690.
- [11] *Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2002. — Vol. 107, no. A12. — Pp. SIA 15–1–SIA 15–16. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002JA009430>.
- [12] *de Coning Estelle, Koenig Marianne, Olivier Jana.* The combined instability index: a new very-short range convection forecasting technique for southern Africa // *Meteorological Applications*. — 2011. — Vol. 18, no. 4. — Pp. 421–439. — URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/met.234>.
- [13] *Grieser Jürgen.* Convection Parameters. — <http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf>. — 2012. — Accessed: 2021-08-06.

- [14] *Cimini D., Nelson M., Güldner J., Ware R.* Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology // *Atmospheric Measurement Techniques*. — 2015. — Vol. 8, no. 1. — Pp. 315–333. — URL: <https://amt.copernicus.org/articles/8/315/2015/>.
- [15] *Grygalashvily Mykhaylo.* Three-dimensional modeling of minor chemical constituents in the mesosphere/lower thermosphere region: Ph.D. thesis / The University of Rostock. — Rostock, Germany, 2008.
- [16] *Berger U., von Zahn U.* The two-level structure of the mesopause: A model study // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 1999. — Vol. 104, no. D18. — Pp. 22083–22093. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999JD900389>.
- [17] *de Grandpré J., Beagley S. R., Fomichev V. I. et al.* Ozone climatology using interactive chemistry: Results from the Canadian Middle Atmosphere Model // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2000. — Vol. 105, no. D21. — Pp. 26475–26491. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000JD900427>.
- [18] *Mlynczak Martin G., Hunt Linda A., Mast Jeffrey C. et al.* Atomic oxygen in the mesosphere and lower thermosphere derived from SABER: Algorithm theoretical basis and measurement uncertainty // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2013. — Vol. 118, no. 11. — Pp. 5724–5735. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jgrd.50401>.
- [19] *Rottman Gary.* The SORCE Mission // *Solar Physics*. — 2005. — Aug. — Vol. 230, no. 1. — Pp. 7–25. — URL: <https://doi.org/10.1007/s11207-005-8112-6>.
- [20] *Rodgers Clive D.* Inverse Methods for Atmospheric Sounding. — WORLD SCIENTIFIC, 2000. — URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/3171>.
- [21] *Chib Siddhartha, Greenberg Edward.* Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm // *The American Statistician*. — 1995. — Vol. 49, no. 4. — Pp. 327–335. — URL: <http://www.jstor.org/stable/2684568>.
- [22] *Mosegaard Klaus, Tarantola Albert.* Probabilistic Approach to Inverse Problems // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology (Part A). — Amsterdam Boston: Academic Press, 2002. — Pp. 237–265. — URL: http://www.ipgp.fr/~tarantola/Files/Professional/Papers_PDF/InverseProblemHandbk.pdf.

БЕЛИКОВИЧ Михаил Витальевич

**РАЗВИТИЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И
ПРОГНОЗА АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

Автореферат

Подписано к печати 27.06.2022
Формат $60 \times 90^{1/16}$. Усл. печ. л. 1.75
Тираж 100 экз. Заказ № 31 (2022).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46