

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Куликова Михаила Юрьевича
«ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НА ВЫСОТАХ МЕЗОСФЕРЫ – НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ»,
представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Несмотря на многочисленные и весьма дорогостоящие исследования последних нескольких десятилетий, мезосфера - нижняя термосфера (МНТ, высоты от 50 до примерно 100-105 км) остается «террой инкогнита» земной атмосферы, отчасти, из-за значительной удаленности от поверхности земли и области, где расположены спутники. При этом достаточно давно стало ясно, что данная область и протекающие в ней процессы очень чувствительны к антропогенным загрязнениям и изменениям климата, поэтому результаты мониторинга характеристик МНТ можно использовать для построения прогностических моделей и предсказания, что будет происходить с нашей планетой в ближайшее будущее. Структура, динамика, газовый состав, радиационный и тепловой баланс с одной стороны управляются солнечным излучением, но испытывают сильное влияние процессов, возникающих в тропосфере и стратосфере, в частности, волновых движений различных пространственно-временных масштабов, например, внутренних гравитационных волн. Эти волны на высотах мезопаузы разрушаются и генерируют сильную турбулентность, что, в свою очередь, приводит к торможению и развороту среднезональных ветров и возникновению адиабатического нагрева в зимнем полушарии и такого охлаждения в летнем, так что наблюдается сильная отрицательная разница между температурами летней и зимней полярной мезопаузы.

Существует длинный список фундаментальных и практически значимых вопросов на высотах МНТ, которые требуют своего решения. Среди них можно отметить построение более точных моделей, описывающих физико-химические процессы формирования и эволюции интенсивности атмосферных свечений различных возбужденных состояний гидроксила, молекулярного кислорода, азотных компонент и др. (что актуально также для атмосфер других планет, в частности, Марса и Венеры, где, например, зафиксировано свечение возбужденного гидроксила); определение пространственно-временной эволюции фотохимического нагрева МНТ и его роли в формировании наблюдаемой структуры и динамики данной области; исследование образования и эволюция полярных мезосферных облаков; создание новых приборов прямого зондирования наиболее важных характеристик МНТ и методов определения тех из них, которые не поддаются прямым измерениям. Диссертация М.Ю. Куликова посвящена исследованию физико-химических процессов с участием наиболее важных малых газовых примесей МНТ (компонент семейств нечетных соединений кислорода и водорода Ox и HOx : O , $O(^1D)$, O_3 , H , OH , HO_2) как в газовой, так и твердой фазе. Именно экзотермические реакции с участием данных малых газовых составляющих определяют весь химический нагрев данной области. Таким образом, можно заключить, что тема работы является, конечно, актуальной.

В диссертации проведено теоретическое исследование нелинейного отклика фотохимии области мезопаузы на суточные вариации солнечной радиации, выполнено комплексное лабораторное исследование физико-химических процессов с участием частиц полярных мезосферных облаков в результате воздействия солнечного вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения, а также модернизированы или разработаны новые методы восстановления ключевых характеристик МНТ, которые были успешно применены к данным спутникового зондирования.

Можно выделить следующие наиболее важные и интересные результаты:

В первой главе диссертации проведено теоретическое исследование механизма возбуждения двухсуточных фотохимических осцилляций в области мезопаузы, а также реакционно-диффузионных волн в виде распространяющихся (в восточном направлении) с постоянной скоростью фазовых перепадов этих осцилляций вследствие воздействия горизонтальной турбулентной диффузии и проявления зональной неоднородности фазы суточных вариаций освещенности. Показано, что бифуркация удвоения периода фотохимических осцилляций и возникновение режима колебаний с периодом 2 суток возникают

в результате неустойчивости фотохимических осцилляций с периодом 1 сутки, что описывается частным случаем уравнения Матье. Анализ упрощенной системы уравнений показал, что реакционно-диффузионные волны обусловлены специфическим переносом «ветрового» типа, возникающим в амплитудных уравнениях гармонических колебаний концентраций O и H с периодом 2 суток. При этом было выявлено, что направление распространения волны определяется не только зональной неоднородностью фазы внешнего периодического воздействия с периодом 1 сутки, но и определенными фазовыми соотношениями, зависящими от внутренних параметров мезосферной фотохимической системы.

Во второй главе проведено лабораторное исследование физико-химических процессов с участием частиц мезосферных облаков, запускаемых воздействием солнечного вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения на водяной лед. Прежде всего, в этой главе была доказана обоснованность применения озон – метода для калибровки лабораторных УФ источников фотонов, в частности, используемого в данной диссертации. Было показано, что мультиплетная структура ИК поглощения озона около 1040 см^{-1} , возникающая в результате УФ облучения твердого молекулярного кислорода, по всей видимости, связана с димером $\text{O}_3 \cdots \text{O}_3$ и комплексами $\text{O}_3 \cdots (\text{O}_2)_n$, а не с комплексами O с O_3 и O_2 , как предполагалось ранее. На основании лабораторных измерений потоков фотопродуктов из водяного льда в условиях, отвечающих реальной мезопаузе, обнаружено, что почти все продукты реакции фотодиссоциации молекул воды в частицах полярных мезосферных облаков остаются в твердой фазе и основная химическая реакция между ними - это рекомбинация $\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$, которая протекает очень быстро. Это закрывает поставленный в ряде предшествующих работ вопрос о фотодесорбции из водяного льда как возможной причине наблюдаемого истощения атомарного кислорода во время существования полярных мезосферных облаков. Кроме того, выполнены комплексные измерения фотопроизводства H_2O_2 внутри льда H_2O и $\text{H}_2\text{O}:\text{O}_2$ ВУФ излучением с длиной волны 121.6 нм при температурах 20-140К. Обнаружено, что в случае чистого льда перекись образуется при температурах ниже 60К, т.е. гораздо холоднее, чем в реальной мезопаузе. В тоже время, сравнительно небольшая примесь молекулярного кислорода значительно увеличивает эффективность образования H_2O_2 , в том числе, при температурах летней полярной мезопаузы. Проведено детальное исследование кинетики этого процесса во льду $\text{H}_2\text{O}:\text{O}_2$ в зависимости от температуры, времени облучения и его интенсивности, а также определен квантовый выход H_2O_2 . Предсказано образование заметного количества H_2O_2 в частицах полярных мезосферных облаков, даже если они содержат очень мало молекул

кислорода ($\geq 0.1\%$).

Третья глава диссертации посвящена разработке новых методов восстановления характеристик МНТ и их приложению к данным спутникового зондирования. Прежде всего, здесь впервые продемонстрировано, что восстановление характеристик атмосферы с помощью условия фотохимического равновесия некой химически активной примеси с малым временем жизни практически всегда производится математически некорректно, без учета эволюции самого равновесного значения этой примеси, что может приводить к большим неопределенностям восстанавливаемых характеристик. На примере анализа корректности приближения химического равновесия ночного озона на высотах МНТ, широко используемого для восстановления распределений ночных концентраций O и N по данным спутниковых измерений в диапазоне высот 80-100, представлен математически и физически грамотный подход к анализу условия равновесия интересующей нас примеси и его применения при обработке данных измерений. В результате трехмерного численного моделирования мезосферы – нижней термосферы с помощью 3D химико-транспортной модели было показано, что условие химического равновесия ночного озона выполняется выше некоторой границы (кривой равновесия), которая сложным образом зависит от координат и времени и отсекает заметную часть высотно-широтной области, где это условие широко применяется для восстановления распределений концентраций O и N по данным ракетных и спутниковых измерений. Для нахождения реального положения границы химического равновесия ночного озона в конкретной географической точке в интересующий момент локального времени предложено использовать критерий равновесия, представляющий собой простое и удобное для практического использования соотношение между измеряемыми характеристиками мезосферы – нижней термосферы. Приложение критерия к данным спутниковых измерений SABER/TIMED позволило зарегистрировать, что в зависимости от года, сезона и широты граница равновесия ночного озона лежит в диапазоне высот 77–86 км и является чувствительным индикатором эволюции средней атмосферы. Кроме того, установлено, что восстановление ночных O и N с помощью условия химического равновесия ночного озона ниже границы его равновесия приводит к значительной (до 1 порядка по величине) недооценке концентрации O в диапазоне высот 80–85 км, но практически не сказывается на качестве восстановления атомарного водорода. Эти результаты и найденные в первой главе диссертации индикаторы двухсуточных осцилляций были применены к данным SABER/TIMED, что позволило впервые зарегистрировать этот нетривиальный фотохимический процесс непосредственно в самих

данных измерений. Помимо фундаментальной важности, следует отметить практическую ценность результата. Факт регистрации двухсуточных осцилляций открывает возможность для оценки локального значения коэффициента вертикальной турбулентной диффузии - важнейшего, но плохо определяемого динамического параметра, от которого зависят распределения большинства характеристик области мезопаузы. Кроме того, в этой главе был рассмотрен новый столкновительный процесс возбужденных состояний ОН с атомарным кислородом, который представляет собой неизвестный ранее источник возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$. Используя данные спутниковых измерений SABER/TIMED, впервые определена пространственно-временная эволюция ночной концентрации $O(^1D)$ на высотах МНТ. Это позволило показать, что ночные концентрации $O(^1D)$ не близки нулю из-за отключения основного источника (фотодиссоциации озона) и малого времени жизни $O(^1D)$, как предполагалось ранее, а на высотах области мезопаузы сравнимы с дневными значениями концентрации этой компоненты. В конце этой главы была решена еще одна интересная и важная задача. Предложен метод статистически корректной оценки качества одновременных измерений нескольких атмосферных компонент при условии их фотохимического равновесия. Эффективность метода продемонстрирована на примере данных дневных распределений ОН, HO_2 и O_3 , измеренных в течении длительного времени в рамках спутниковой кампании MLS/Aura. Статистическая оценка качества одновременных измерений этих компонент выявила, что данные измерений HO_2 неточны и заметно занижают положение мезосферного максимума концентрации этой компоненты.

Все представленные в диссертации результаты являются новыми, их актуальность, научная и практическая значимость не вызывают никаких сомнений. Они были получены в сотрудничестве с коллегами из известных зарубежных институтов (в частности, Института атмосферной физики университета Ростока и Института Альфреда Вегенера). По теме диссертации опубликовано 23 статьи в известных, уважаемых научных журналах, включенных в международные и российские научные базы цитирования, такие как Web of Science, Scopus и РИНЦ. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается тем, что для их получения применялись аналитические методы теории колебаний и волн, численное моделирование с помощью фотохимических моделей различной размерности, методы лабораторного исследования физико-химических процессов внутри ледяных образцов, облучаемых в вакуумных условиях фотонами или энергичными частицами, статистические методы восстановления характеристик системы по зашумлённым временным рядам экспериментальных данных.

По диссертации имеется несколько замечаний.

1. В разделе 3.3, на рисунке 3.6 построенный критерий равновесия ночного озона был наложен на распределения $\langle O_3 / O_{3\text{ eq}} \rangle$. В целом, видно, что линия $Cr = \tau_{O_3} / \tau_{O_{3\text{ eq}}} = 0.1$ хорошо повторяет кривую равновесия ночного озона, но в ряде случаев есть незначительные (около 1 км) смещения границы по критерию вниз. Не проведено обсуждение, с чем это может быть связано и можно ли в принципе достичь более лучшего согласия с кривой равновесия, полученной по результатам численного моделирования.

2. В диссертации найдены индикаторы двухсуточных фотохимических осцилляций и впервые зарегистрирован этот феномен в данных измерений. Понятно, что реакционно-диффузионные волны - более сложный, пространственно-распределенный эффект. Тем не менее, было бы желательно увидеть обсуждение, каким образом эти волны можно попытаться зафиксировать.

Несмотря на сделанные замечания, мое мнение о диссертации – самое высокое. Диссертационная работа Куликова М.Ю. значительно расширяют понимание нетривиальных свойств химических процессов на высотах МНТ, проясняют возможное влияние солнечного облучения мезосферного льда на эти процессы, вносят существенный вклад в решение проблемы мониторинга пространственно-временных распределений наиболее важных химических и динамических характеристик МНТ и, вообще говоря, подлежащих областей атмосферы.

Содержание диссертации было доложено на семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук.

Автореферат правильно отражает структуру, методы, подходы и результаты диссертации, дает возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне.

Диссертационная работа Куликова Михаила Юрьевича «Исследование физико-химических процессов на высотах мезосферы – нижней термосферы» отвечает всем требованиям

«Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК к диссертационным работам на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. Автор диссертации, Куликов Михаил Юрьевич, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент:

Заместитель директора ИКИ РАН,
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.,
по специальности 01.03.04 - Планетные исследования

Кораблев О.И.

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Кораблев Олег Игоревич, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук
Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32
Тел.: 49533001; E-mail: korab@iki.rssi.ru

Подпись заместителя директора ИКИ РАН, член-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук Кораблева Олега Игоревича заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН
к.ф.-м.н.

печать



Садовский А.М.