

УТВЕРЖДАЮ

И.о. ректора

Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

«Российский государственный гидрометеорологический университет»


Бикезина Т.В.
2021 г.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

«Российский государственный гидрометеорологический университет»

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

Одним из важных направлений исследования атмосферы в последнее время является исследование ее областей, значительно удаленных от земной поверхности. Одна из таких областей - мезосфера и нижняя термосфера (МНТ, высоты примерно 50-100 км) - остается плохо изученной, несмотря на множество экспериментальных кампаний, лабораторных и теоретических исследований, проведенных в последние несколько десятилетий. Процессы, протекающие в МНТ, имеют существенный фундаментальный и практический интерес. Во-первых, это возможность уникальных

явлений, таких как: мезосферные облака - самые высокие облака в земной атмосфере, механизмы образования и эволюции которых до сих пор обсуждаются; заметная отрицательная разница между температурами летней и зимней мезопаузы; атмосферные свечения возбужденных состояний гидроксила, молекулярного кислорода и др.; возможность нетривиальных фотохимических осцилляций в области мезопаузы; разнообразные волновые движения; турбулентность, вызываемая гравитационными волнами, которые генерируются сильно ниже; вторжения высокоэнергичных заряженных частиц; и др. Во-вторых, МНТ и ее характеристики гораздо более чувствительны, чем, например, в тропосфере, к росту парниковых газов и наблюдаемым климатическим изменениям, поэтому их можно использовать в качестве предикторов будущих изменений состояния всей атмосферы Земли. На высотах МНТ формируются первые два слоя ионосферы (D и E), таким образом, эволюция этой области оказывает существенное влияние на распространение радиоволн и глобальную электрическую цепь. Одной из основных проблем исследования МНТ является разработка методов мониторинга ее наиболее важных характеристик, многие из которых не поддаются прямым измерениям. Работа М.Ю. Куликова посвящена решению ряда взаимосвязанных задач с участием наиболее важных малых газовых составляющих МНТ, которые определяют химический состав и вносят существенный вклад в энергетический и радиационный баланс данной области атмосферы. В этой связи тема работы является, несомненно, своевременной и актуальной.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий ее объем составляет 182 страницы и включает 74 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 231 наименование.

В первой главе диссертации проведено аналитическое исследование двухсуточных фотохимических осцилляций и реакционно-диффузионных волн в виде фазовых перепадов этих осцилляций. Кроме того, выполнен поиск основных индикаторов этого феномена, необходимых для их последующей экспериментальной регистрации. Показано, что двухсуточные фотохимические осцилляции в области

мезопаузы возникают в результате неустойчивости обычных вынужденных колебаний мезосферной фотохимии с периодом 1 сутки за счет соответствующей вариации солнечной освещенности, неустойчивость описывается частным случаем уравнения Матье. Установлен механизм генерации порождаемых этими осцилляциями реакционно-диффузионных волн и определено выражение, определяющее их направление распространения и зависимость скорости от коэффициента турбулентной горизонтальной диффузии и длины зональной окружности. Определены индикаторы возбуждения двухсуточных фотохимических осцилляций, необходимые для регистрации этих осцилляций в экспериментальных данных.

Во второй главе проведено комплексное лабораторное исследование физико-химических процессов с участием частиц мезосферных облаков, запускаемых воздействием солнечного вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения на водяной лед. Кроме того, в этой главе представлены результаты исследования продуктов фотолиза замороженного молекулярного кислорода ВУФ излучением с длиной волны 121.6 нм с целью проверки обоснованности применения озон – метода для калибровки лабораторных ВУФ источников фотонов. Показано, что сложная структура полосы ИК поглощения озона в диапазоне длин волн около 9.6 мкм, возникающая в результате облучения твердого молекулярного кислорода УФ излучением, может быть связана с образованием димера $O_3 \cdots O_3$ или комплексов $O_3 \cdots (O_2)_n$, но не с комплексами O с O_3 или O_2 , как предполагалось ранее в предшествующих диссертационных работах. На основании лабораторных измерений потоков фотопродуктов из водяного льда в условиях, отвечающих реальной мезопаузе, выяснена роль фотодесорбции из частиц полярных мезосферных облаков для фотохимии области мезопаузы. Кроме того, выполнены комплексные измерения фотопроизводства H_2O_2 внутри льда H_2O и $H_2O:O_2$ ВУФ излучением с длиной волны 121.6 нм при температурах 20-140К. Обнаружено, что в случае чистого льда H_2O_2 образуется при температурах ниже 60К. В случае льда $H_2O:O_2$ H_2O_2 образуется во всем диапазоне температур 20-140К в результате реакции псевдопервого порядка.

Проведено детальное исследование кинетики этого процесса во льду $\text{H}_2\text{O}:\text{O}_2=9:1$ в зависимости от температуры, времени облучения и его интенсивности, а также определен квантовый выход H_2O_2 в зависимости от температуры. Показано, что если частицы полярных мезосферных облаков содержат хоть немного молекулярного кислорода (около 0.1%), то концентрация H_2O_2 в твердой фазе будет достигать ее типичных газофазных величин на высотах мезопаузы.

В третьей главе проведена разработка новых методов восстановления ключевых характеристик МНТ и их приложение к данным спутникового зондирования. В результате трехмерного численного моделирования мезосферы – нижней термосферы с помощью глобальной химико-транспортной модели 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 H 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 H 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.

Используя данные спутниковых измерений SABER/TIMED, впервые определена пространственно-временная эволюция ночной концентрации $\text{O}(^1\text{D})$ 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 результате анализа данных спутниковых измерений SABER/TIMED и с помощью индикаторов, найденных в первой главе, впервые зарегистрированы двухсуточные фотохимические осцилляции в реальной мезопаузе.

Предложен метод статистически корректной оценки качества одновременных измерений нескольких атмосферных компонент при условии их фотохимического равновесия. Эффективность метода продемонстрирована на примере данных дневных распределений OH , 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.

Диссертация написана хорошим и грамотным языком. Постановка задач и результаты их решения описаны подробно и ясно.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Все представленные результаты являются новыми, их достоверность не вызывает сомнений. Они обсуждались на многих международных и всероссийских конференциях и хорошо известны специалистам. Результаты диссертации опубликованы в 23 статьях в ведущих научных журналах, включенных в международные и российские научные базы цитирования, такие как Web of Science, Scopus и РИНЦ. Все 23 статьи опубликованы в научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. Примерно половина статей опубликована в последние 5 лет, что подчеркивает новизну и актуальность полученных результатов. Особенно можно отметить наличие статей в профильных журналах Европейского

союза наук о Земле и Американского геофизического союза, которые известны строгим рецензированием, что дополнительно подтверждает достоверность, новизну и актуальность результатов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и дает возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне.

Содержание диссертации было доложено на семинаре кафедры метеорологических прогнозов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» 23 сентября 2021 г (протокол № 2).

По работе есть несколько замечаний.

1. В работе не обоснована возможность исключения из рассмотрения в мезосферной фотохимической системе химических реакций с участием азотных малых газовых составляющих и заряженных компонентов, оказывающих существенное влияние на распределение кислородных и водородных малых газовых составляющих мезосферы и нижней термосферы.

2. Во второй главе недостаточно четко описана связь между тремя описанными в ней направлениями исследования: изучение применимости метода калибровки источника фотонов в полосе Лайман-альфа, исследование фотодесорбции из частиц полярных мезосферных облаков и изучение образования перекиси водорода в полярных мезосферных облаках.

3. На большинстве рисунков обозначения осей приведены на английском языке, что не мешает их пониманию, но не до конца соответствует принципам оформления русскоязычных научных трудов.

Приведенные выше замечания не умаляют научной значимости диссертации. Диссертация Куликова Михаила Юрьевича представляет собой систематическое законченное научное исследование в области физики атмосферы. Совокупность результатов и положений, содержащихся в диссертации, позволяет классифицировать ее как значительное достижение в этой области. Результаты диссертации вносят значительный фундаментальный вклад в понимание ряда интересных особенностей

физико-химических процессов на высотах мезопаузы, особенно в контексте образования и эволюции полярных мезосферных облаков. Кроме того, развитие методов непрямого мониторинга наиболее важных, но плохо измеряемых характеристик МНТ имеет важную практическую значимость не только для мониторинга этой области, но и других областей атмосферы.

Таким образом, диссертация М.Ю.Куликова является законченным научным трудом, в котором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное достижение в развитии перспективного направления в физике атмосферы и гидросферы.

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, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв составил:

профессор кафедры
метеорологических прогнозов РГГМУ
д.ф.-м.н.

Погорельцев А.И.

Подпись профессора кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ, доктора физико-математических наук Погорельцева Александра Ивановича заверяю.

Подпись Погорельцева А.И. завершено
Нач. управления
Кадровое управление
Ан, Лобова Л.В.

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертации Куликова Михаила Юрьевича «**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ВЫСОТАХ МЕЗОСФЕРЫ – НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ**», представленной к защите на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»
Сокращенное название организации	РГГМУ
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Руководитель организации	Михеев Валерий Леонидович
Адрес организации	192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., дом 79
Телефон	+7 (812) 633-01-82
Адрес электронной почты	rector@rshu.ru
Официальный сайт в сети Интернет	www.rshu.ru

Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации соискателя за последние 5 лет:

1. Grygalashvyly M., Pogoreltsev A.I., Andreyev A.B., Smyshlyaev S.P., Sonnemann G.R. Semi-Annual variation of excited hydroxyl emission at mid-latitudes // *Annales Geophysicae*, 2021, 39(1), стр. 255–265
2. Koval A.V., Wen Chen, Didenko K.A., Ermakova T.S., Gavrillov N.M., Pogoreltsev A.I., Toptunova O.N., Ke Wei, Yarusova A.N., Zarubin A.S. Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // *Ann. Geophys.* 39. 2021. pp. 357-368.
3. Jakovlev A.R., Smyshlyaev S.P., Galin V.Y. Interannual variability and trends in sea surface temperature, lower and middle atmosphere temperature at different latitudes for 1980–2019 // *Atmosphere*, 2021, 12(4), 454
4. Зоркальцева О.С., Мордвинов В.И., Погорельцев А.И., Домбровская Н.С. Динамика среднезональных характеристик циркуляции в средней атмосфере // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. том 56. № 4. С. 433–445.
5. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и параметров стратосферного полярного вихря в

Арктике по данным моделирования и реанализа // ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА. 2020. том 56. № 5. С. 526–539.

6. Smyshlyaev S.P., Galin V. Y., Blakitnaya P.A. Jakovlev A.R. Numerical Modeling of the Natural and Manmade Factors Influencing Past and Current Changes in Polar, Mid-Latitude and Tropical Ozone // Atmosphere, 2020, 11, 76;

7. Смышляев С. П. Блакитная П. А. Моцаков М. А. Численное моделирование влияния физических и химических факторов на межгодовую изменчивость содержания озона в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 21–32.

8. Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Макарова М.В., Фока С.Ч. Сопоставление данных SAMS по содержанию CO₂ с результатами измерений в Петергофе // Оптика атмосферы и океана, 2020, Т. 33, № 10, с. 805-810

9. Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И. Чувствительность средней меридиональной циркуляции к воздействию орографических волн при различных фазах квазидвухлетних колебаний в численной модели средней атмосферы // Химическая физика. 2019. Том 38. № 7. С. 37-43.

10. Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Численное моделирование воздействия мирового океана на температуру и содержание озона в нижней и средней атмосфере // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 25–37

11. Luyang Xu, Ke Wei, Xue Wu, Smyshlyaev S. P., Wen Chen, Galin V. Ya. The Effect of Super Volcanic Eruptions on Ozone Depletion in a Chemistry-Climature Model // Advances in Atmospheric Sciences, Vol. 36, Issue 8, pp 823–836, 2019.

12. Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Влияние южной осцилляции на динамику стратосферы и озоновый слой Арктики // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 98-113.

13. Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И., Зоркальцева О.С., Мордвинов В.И. Влияние осцилляции Маддена - Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внетропической стратосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. том 59. № 1. с. 114-124

14. Koval A. V., Gavrilov N. M., Pogoreltsev A. I., Drobashevskaya E. A., Numerical simulation of the mean meridional circulation in the middle atmosphere at different phases of stratospheric warmings and mountain wave scenarios//J. Atmos. Solar-Terr. Phys.- 2019, V.183.- С. 11-18.

15. Ermakova T.S., Aniskina O.G., Statnaya I.A., Motsakov M.A., Pogoreltsev A.I. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // Earth, Planets and Space. – 2019. – Vol. 71:8.

И.о. ректора РГГМУ



Бикезина Т.В.

Дата