

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Саункина Андрея Витальевича
«ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ
СВЕЧЕНИЯ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА 557.7 НМ И
ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ НАД ВОСТОЧНОЙ
СИБИРЬЮ СПУТНИКОВЫМИ И НАЗЕМНЫМИ
ИНСТРУМЕНТАМИ»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.6.18 - Науки об атмосфере и климате

Актуальность темы диссертации обусловлена важностью исследований области мезопаузы как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, особенно в контексте воздействия нижележащей атмосферы на ближний космос и освоения сверхнизких околоземных орбит (160-250 км). Как известно, эта область является фактически последним доменом атмосферы перед космосом и остается на сегодняшний день ее наименее изученной частью, т.е. для нее пока существует заметный дефицит наблюдений и знаний. Это вызвано как объективными трудностями зондирования мезопаузы, так и сложностью адекватного модельного описания протекающих здесь процессов. В мезопаузе зарегистрирован ряд уникальных явлений, характеристики которых могут, как представляется, быть чувствительными индикаторами и предикторами глобальных изменений климата и антропогенного воздействия на состав атмосферы. На этих высотах летняя температура высоких широт может опускаться до самых низких в земных условиях значений (ниже 100К). При температурах воздуха ниже 150К происходит конденсация водяного пара и образование самых высотных облаков в атмосфере Земли, так называемых полярных мезосферных облаков. Многие слоистые (локализованные по высоте) явления в мезопаузе связаны с фотохимией, поскольку вследствие разреженности воздуха над этим высотным регионом интенсивность солнечного ультрафиолетового излучения в области мезопаузы близка к максимальной. Фотодиссоциация молекулярного кислорода и паров воды приводит к формированию слоев атомарного кислорода и водорода, которые за счет

запасенной энергии Солнца оказывают существенное влияние на большинство физико-химических процессов на данных высотах. Образование этих слоев, в частности, проявляется в возникновении вторичного озонового максимума и свечений атмосферного воздуха (airglow), обусловленных возбужденными состояниями OH, O и O₂. Данные свечения довольно хорошо регистрируются как с поверхности Земли, так и из космоса в видимом и инфракрасном диапазонах и уже многие десятилетия используются для мониторинга, например, климатических изменений на высотах мезопаузы. Следует также отметить, что исследование влияния нижележащей атмосферы на ближний космос стало одной из наиболее быстро развивающихся тем в солнечно-земной физике за последние два десятилетия и собственно является основной причиной разработки моделей всей атмосферы (Jackson et al., 2019). Это воздействие осуществляется именно через мезопаузу, которая есть динамически активная область, где атмосферные волны, распространяющиеся из нижней и средней атмосферы, частично диссипируют и передают свой импульс и энергию среднему потоку (Fritts & Alexander, 2003), вызывая изменения глобальной циркуляции на этих высотах. Благодаря динамо-эффектам эти волновые сигналы могут передаваться на ионосферные высоты до ~300 км (Goncharenko et al., 2021). Таким образом, мезопауза является атмосферным «проводником», передающим изменчивость нижних слоёв атмосферы в состояние геокосмической среды, где она влияет на работу космических аппаратов, спутниковую связь и навигацию. Поэтому чем лучше мы знаем и моделируем эту пограничную область между атмосферой и ближним космосом, тем лучше можем воспроизводить изменчивость нижней термосферы и ионосферы, в том числе в области сверхнизких околоземных орбит. Поэтому тема работы является, конечно, актуальной.

Новизна исследования и полученных результатов, на мой взгляд, определяется взаимосвязанностью и взаимодополняемостью довольно заметного числа решаемых задач, включающих в себя обработку больших массивов данных наземных и спутниковых данных и их сопоставление на разных временных масштабах.

Диссертация состоит из введения, 6-ти глав и заключения.

Во **введении** сформулировано обоснование актуальности цели диссертации и решаемых задач, а также представлены все стандартные разделы, соответствующие правилам подготовки диссертаций.

В **первой** главе, которая, по-видимому, носит вспомогательный характер для

потенциального читателя, кратко суммированы общеизвестные представления о структуре атмосферы, основных свойствах мезопаузы, физико-химических механизмах формирования слоев свечения ОН и О, наземных и спутниковых инструментов их мониторинга, особенностях годовой эволюции на средних широтах, результатов сопоставления спутниковых и наземных измерений, существующих моделях верхней атмосферы. По итогам этой главы более четко сформулированы цели и задачи диссертации.

Во **второй** главе представлены (1) функциональные свойства и характеристики наземных приборов, измеряющих собственное свечение атмосферы в оптическом и ИК диапазонах в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (п. Торы) и на оптическом полигоне Маймага (Якутия), спутниковых кампаний и эмпирической модели, совместные данные которых используются в последующих главах, (2) особенности комплекса программ авторской разработки для работы с этими данными, в частности, визуализации, а также для построения карт облачности над местом наземных спектрометрических наблюдений по спутниковым данным и автоматического выделения моментов времени, отвечающих хорошей погоде. Кроме того, в данной главе проведено сопоставление особенностей данных спутниковых приборов MLS/Aura и SABER/TIMED в окрестности п. Торы и продемонстрировано, что для решения задач диссертации лучше подходят данные SABER.

В **третьей** главе представлен метод определения вертикального профиля объемной скорости эмиссии $O(^1S)$ по данным SABER, включающий в себя восстановление профиля О по одновременно измеренным профилям температуры, давления и объемной скорости эмиссии возбужденного ОН вблизи 2 мкм за счет переходов 9-7 и 8-6. Рассмотрено три варианта данных О: 1 набор получен по методике, предложенной в работе [Mlynczak et al., 2013], 2 набор – по той же методике, но с поправленными коэффициентами в соответствие с работой [Mlynczak et al., 2018], 3 набор получен по методике, предложенной в работе [Panka et al., 2018]. Показано, что с точки зрения числа профилей О и $O(^1S)$ больше подходят данные по [Mlynczak et al., 2013].

В **четвертой** главе, во-первых, используя ряды данных, полученные в предшествующей главе, проведено сравнение интегральной интенсивности излучения слоя $O(^1S)$ над п. Торы по данным SABER с наземными некалиброванными измерениями этой характеристики прибором ИФП. Используя зимне-весенние данные, удалось выявить

заметную корреляцию между рядами, привести их к одним единицам и таким образом откалибровать наземные данные. Кроме того, линейная подгонка температур, определяемых ИФП, к ряду реальных температур по SABER в зависимости от высоты позволила найти оптимум и также откалибровать данные ИФП. Сопоставление исправленного таким образом ряда температуры ИФП с эффективной температурой излучающего слоя $O(^1S)$ по данным SABER позволило добиться удовлетворительного согласия только за счет принудительного смещения излучающего слоя вверх на несколько км. На основании обсуждения полученных результатов сделаны выводы о необходимости соответствующей корректировки физико-химических моделей формирования слоев $O(^1S)$ и OH^* .

В пятой главе проведено сопоставление среднемесячной изменчивости температуры мезопаузы и интенсивности излучения $O(^1S)$ над п. Торы, усредненных за 2017-2021 гг. по данным двух наземных приборов (ИФП и САТИ), а также результатов обработки данных SABER и модели NRLMSIS. Как для температуры, так и для интенсивности излучения выявлено неплохое соответствие данных ИФП с SABER в зимне-весеннее время и заметное рассогласование в летне-осеннее время. Судя по представленным данным, интенсивность излучения по данным САТИ в летне-осеннее время лучше соответствует SABER, чем ИФП. В тоже время, данные по модели NRLMSIS демонстрирует заметные отличия от всех других данных.

Наконец, в последней главе проведен композиционный анализ вариаций свечений $O(^1S)$ и OH^* и температуры над п. Торы и ОП Маймага соответственно во время внезапных стратосферных потеплений мажорного типа в 2003-2023 гг. по данным наземных приборов ИФП и Shamrock (измеряет излучение $OH(3-1)$) в сравнение с таким же анализом результатов обработки данных SABER над этими регионами. Показано, в частности, что, в отличие от данных SABER, которые распределены по высоте, наземные измерения не позволяют выделять из общей динамики данных значимые паттерны возмущений, вызываемые именно ВСП. Как показано на тех же данных SABER, это обусловлено сложной динамикой излучающих слоев $O(^1S)$ и OH^* как в преддверии, так и после этих событий.

Основные результаты диссертации опубликованы в научной печати, в частности, в четырех реферируемых статьях в известных российских и зарубежных журналах из списка ВАК и четырех статьях в просидингах международных конференций, индексируемых в

SCOPUS, а также были представлены на ведущих российских и международных конференциях. Помимо апробации путем публикаций и докладов, диссертация демонстрирует уровень анализа, обеспечивающий высокую обоснованность и достоверность полученных результатов. Тем не менее, работа не свободна от недостатков:

1. Глава 1 содержит, как мне кажется, ряд неточностей:

Стр.13: «... летом над полюсами наблюдается минимальные значения температуры (до 150K)». Как я уже упоминал, температура в летней полярной мезопаузе может опускаться ниже 100K [Schmidlin, Geophys. Res. Lett., 1992]. В частности, в работе [Sheese et al., Geophys. Res. Lett., 2011] на высоте 92 км зарегистрирована температура 91 ± 6 K.

Стр. 21. Здесь приведены реакции формирования эмиссии гидроксила, однако не указано, что за счет реакции $H+O_3$ эффективно заселяются только верхние уровни OH^* , а образование OH^* на нижних уровнях осуществляется за счет переходов с верхних в результате столкновений с O , O_2 и N_2 .

В разделе «1.4. Модели для исследования верхней атмосферы» перечислен далеко неполный список моделей, в частности, не указаны многие широко используемые модели: WACCM-X, UA-ICON, TIEGCM, WAM, CMAM, KMCM, NIAMCM и др.

2. В Главе 2 очень важный момент описан, на мой взгляд, довольно скупо, менее 1 стр. Речь идет о построении карт облачности над п. Торы по спутникам NOAA с помощью комплекса «Алиса» и фильтрации данных наземных приборов. В частности, неясно, какова погрешность метода, насколько 1 пиксель на рис. 21 соответствует узкому углу обзора того же прибора ИФП, при каком пороге облачности производилась фильтрация. Более того, здесь приведена ссылка на статью по теме диссертации [Подлесный и др., 2022], в которой рассматривались разные методы определения процента облачности над п. Торы: с помощью широкоугольной цифровой камеры, по данным реанализа и по спутникам NOAA. Один из выводов этой статьи, что «Вследствие нерегулярности и большой дискретности спутниковых данных и сложности определения облачности в темное время суток, уверенных выводов о применимости спутниковых данных сделать не удалось» вызывает недоумение в контексте использования этого метода в последующих главах диссертации.

3. В Главе 3 (см. рис. 23-24) представлены профили O , восстановленные автором из данных SABER в соответствие с работами [Mlynchak et al., 2013] и [Mlynchak et al., 2018]. Как я уже отмечал, это один и тот же метод, только в [Mlynchak et al., 2018] заметно

поправлены коэффициенты модели возбужденного OH , в частности, очень сильно увеличены константы столкновения OH^* с O . Меня смущают 2 обстоятельства. Во-первых, концентрации O по [Mlynchak et al., 2018] выше ~ 92 км заметно больше, чем по [Mlynchak et al., 2013], что противоречит статье [Mlynchak et al., 2018], где показана обратная ситуация (см. рис. 1 там): вследствие увеличения указанных констант концентрация O уменьшается. Во-вторых, выше ~ 101 км концентрация O на рис. 23 сильно и резко возрастает. По моему опыту работы с данными SABER, такие выбросы O обычно эффективно убираются за счет фильтров, предложенных в [Mlynchak et al., 2013]. В тексте диссертации, к сожалению, я не нашел информации на счет использования этих фильтров.

4. В Главе 4 при сопоставлении температурных данных прибора ИФП с эффективной температурой излучающего слоя $\text{O}(^1\text{S})$ по данным SABER не принято во внимание, что температура SABER в верхней части мезопаузы демонстрирует заметную систематическую ошибку. Кроме того, константы физико-химических моделей формирования слоев $\text{O}(^1\text{S})$ и OH^* , используемые в диссертации, имеют известные неопределенности, учет которых хотя бы отчасти мог бы объяснить зарегистрированные расхождения. Отмечу также, что как в этой главе, так и в предыдущей было бы уместно провести сравнение с профилями объемной скорости эмиссии $\text{O}(^1\text{S})$, измеренными SCIAMACHY/ENVISAT. Этот прибор работал в 2002-2012 гг, но для целей диссертации можно было бы использовать данные, измеренные над п. Торы в той же фазе предыдущего солнечного цикла.

5. В выводах Главы 5 приведено предположение, что «Высокие значения интенсивности по SABER летом могут быть обусловлены остаточным эффектом в атмосфере от свечения солнца после заката вследствие чего некоторые фотохимические процессы могут не учитываться в модели расчета I 557,7 нм». Данное предположение выглядит маловероятным, учитывая слабое воздействие суточных вариаций освещенности на атомарный кислород на высотах формирования этого свечения. Кроме того, дискуссия отличий данных ИФП от обработки данных модели NRLMSIS не выглядит убедительной, учитывая, что эта модель далеко не есть истина и желательно было бы посмотреть другие модельные данные, например, WACCM-X.

6. В диссертации есть неудачные обороты и опечатки, а также довольно много ошибок с расстановкой запятых.

Несмотря на сделанные замечания, у меня сложилось самое положительное мнение о диссертации. Автореферат правильно отражает структуру, методы, подходы и результаты диссертации, дает возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне. Диссертация Саункина Андрея Витальевича является законченной научно - квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г.), а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 - Науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией атмосферных исследований,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)
Куликов Михаил Юрьевич

Куликов 06.03.2026

Контактные данные:

телефон: +79103819028, e-mail: kulm@ipfran.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы (1.6.18 - Науки об атмосфере и климате)

Адрес места работы:

603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

телефон: +7 (831) 436-62-02, e-mail: dir@ipfran.ru

Подпись сотрудника ИПФ РАН М.Ю. Куликова удостоверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.



И.В. Корюкин

06.03.2026