

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 551.510.43



Саункин Андрей Витальевич

**Исследование изменчивости интенсивности свечения атомарного кислорода 557.7 нм
и температуры области мезопаузы над Восточной Сибирью
спутниковыми и наземными инструментами**

Специальность 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН).

Научный руководитель:

Васильев Роман Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий отделом физики атмосферы и околоземного космического пространства.

Официальные оппоненты:

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

Колтовской Игорь Иннокентьевич, кандидат физико-математических наук, Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН — обособленное подразделение ФГБУН «Якутский научный центр СО РАН», и.о. зав. лаб. оптики атмосферы, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Защита состоится "___" 2026 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://iszf.irk.ru> и в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Ярюкевич Ю.В.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время активно развивается комплексный подход к изучению атмосферных процессов на нашей планете. Одной из сторон такого подхода является переход от климатических моделей к моделям Земной системы. Под этим понимается включение в климатические модели процессов переноса и трансформации малых газовых примесей, динамики растительности и биоты в почве и океане, а также динамических и химических процессов в верхних слоях атмосферы [Kulyamin, 2015]. Для нижнего слоя атмосферы (тропосфера, стратосфера) накоплены многолетние данные наблюдений, обобщенные в климатических архивах, успешно используются модели общей циркуляции атмосферы. Влияние верхней атмосферы на циркуляцию нижних слоев атмосферы пока еще изучено недостаточно. Изучение средней и верхней атмосферы представляет и самостоятельный интерес, обусловленный необходимостью решения задач радиофизики и прогноза космической погоды. Эти задачи диктуют необходимость включения в комплексные модели Земной системы описания динамики мезосферы и нижней термосферы.

Наиболее удобным и информативным объектом для дистанционного изучения мезосферы и нижней термосферы (МНТ) является собственное излучение атмосферы. Оно доступно для регистрации как наземными, так и спутниковыми оптическими приборами, а его параметры несут прямую информацию о физических условиях в этих слоях. Вследствие различий в физических принципах спутниковых и наземных методов наблюдения за верхней атмосферой, регулярно возникает необходимость в сравнительном анализе получаемых данных. К примеру, в работе [Medvedeva, 2013] было установлено, что в районах Иркутска и Звенигорода на высотах 84 и 88 км спутниковые данные регистрируют более низкую температуру по сравнению с наземными измерениями.

Из всего спектра свечения ночного неба зеленое свечение области мезопаузы было обнаружено первым еще в начале прошлого века [Fukuyma, 1977]. Это свечение атомарного кислорода с длиной волны 557.7 нм происходит вблизи области мезопаузы (~90–100 км), немного выше свечения гидроксила (~85–90 км), и является результатом рекомбинации атомов кислорода. Источником этих атомов служит процесс фотодиссоциации молекул O_2 , инициируемый ультрафиолетовым излучением Солнца [Semenov, Shefov, 2008]. Мониторинг свечения атомарного кислорода 557.7 нм является одним из основных инструментов исследования термодинамического состояния мезосферы — нижней термосферы (МНТ), поэтому в настоящее время это ночное свечение атмосферы достаточно хорошо изучено. Однако имеется ряд нерешенных задач, например, не до конца объяснены особенности суточных и сезонных вариаций интенсивности 557.7 нм (I557.7 нм) на различных широтах. Наиболее изученными являются низкие широты, для которых накоплены многолетние измерения с геостационарных спутников [Takahashi et al., 1995; Shepherd et al., 2006]. В средних и высоких широтах основной мониторинг I557.7 проводится на отдельных наземных станциях или с помощью лимбовых спутников [Fukuyma, 1977; Cogger et al., 1981]. Исследования подтверждают потенциал интерферометров Фабри — Перо, установленных в высоких широтах, в мониторинге температуры и ветра посредством анализа доплеровского уширения и смещения линии 557.7 нм [Kosch et al., 2000; Holmes et al., 2005]. Тем не менее, валидация таких измерений спутниковыми данными остается редкой практикой. Различие между методами заключается в их разрешении: наземные системы фиксируют процессы с минутной дискретностью (приливы, гравитационные волны), тогда как спутники отображают глобальную структуру явлений. Следовательно, совместный анализ наземных и спутниковых данных будет способствовать получению новых сведений, например, о пространственной динамике слоя свечения 557.7 нм.

Взаимная верификация данных, получаемых со спутниковых и наземных инструментов, представляет собой технически сложную задачу, обусловленную принципиальными различиями в методиках измерений. Наземные приборы регистрируют

интегральные параметры, тогда как спутниковые — вертикальные профили атмосферных характеристик. Для обеспечения корректного сопоставления спутниковые данные требуют специальной обработки. В связи с этим разрабатываются производные продукты, которые, используя исходные спутниковые данные и существующие модели атмосферы, позволяют рассчитать интегральные параметры, максимально приближенные к тем, что регистрируются наземными инструментами.

Сверхнизкие околоземные орбиты (ССО) на высотах от 160 до 250 км обладают операционными преимуществами, включая снижение стоимости миссий (техническое оснащение спутникового инструмента), улучшение характеристик связи и дистанционного зондирования. Однако эксплуатацию осложняют повышенное атмосферное сопротивление, воздействие атомарного кислорода (эрозия) и ионосферные помехи. Недостаточная изученность региона обусловлена сложностью взаимодействия фотохимических, плазмохимических и динамических процессов, требующих разработки комплексных моделей для прогнозирования условий. Таким образом, изучение эмиссии 557.7 нм является прямым инструментом для исследования самой среды СОО, так как предоставляет сведения о концентрации и распределении атомарного кислорода, который может вызывать эрозию материалов спутника. Исследование эмиссии 557.7 нм — это не просто астрофизическое наблюдение, а практический метод диагностики среды на сверхнизких орбитах, необходимый для оценки рисков и успешного планирования будущих миссий.

На сегодняшний день появляется новый инструментарий, включающий спутниковые и наземные данные, продукты на основе фотохимических и эмпирических моделей. Это создает предпосылки для исследований в рамках комплексного подхода, интегрирующего спутниковые и наземные наблюдения.

Целью диссертационной работы является сопоставление параметров верхней атмосферы над Восточной Сибирью: интенсивностей свечения атомарного кислорода на длине волны 557.7 нм, регистрируемой новым экспериментальным инструментом и синтезированной из спутниковых данных, а также температур в слое этого свечения, полученных наземными и спутниковыми инструментами.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Создание программного комплекса для загрузки, обработки и визуализации спутниковых данных.
2. Сравнение данных различных спутниковых инструментов для возможности исследования слоя свечения атомарного кислорода.
3. Создание алгоритма расчета интенсивности свечения атомарного кислорода 557.7 нм по данным о физико-химическом составе мезосфера — нижней термосфере, полученном с помощью спутникового инструмента.
4. Сравнение интенсивностей 557.7 нм и температур эмиссионного слоя по данным спутникового инструмента, наземных инструментов и эмпирических моделей верхней атмосферы.
5. Взаимная корректировка (калибровка) параметров верхней атмосферы, получаемых наземными и спутниковыми инструментами.
6. Исследование среднемноголетних сезонных вариаций параметров слоя свечения 557.7 нм над Юго-Восточной Сибирью по данным наблюдений и моделирования.
7. Исследование влияния ВСП на параметры эмиссионных слоев атомарного кислорода и гидроксила над Сибирью.

Научная новизна работы

Предложен новый оригинальный метод расчета интенсивности свечения атомарного кислорода на длине волны 557.7 нм (I557.7) по данным спутникового инструмента SABER, основанный на простых фотохимических моделях. Ключевым результатом является вычисление высотного профиля I557.7 на основе профиля концентрации атомарного

кислорода ([O]). Все необходимые для расчета параметры — химический состав и температура мезопаузы — также были получены из измерений SABER. Продемонстрировано, что рассчитанная по этой методике ночная I557.7 находится в хорошем соответствии с наземными наблюдениями.

Предложен новый метод для корректного сопоставления температур, наблюдаемых наземным и спутниковым инструментами, в котором используется смещение высоты слоя свечения для расчета эффективной температуры (температура с учетом эмиссионного слоя 557.7 нм) по спутниковым данным и минимизация методом наименьших квадратов разности сезонных вариаций.

Впервые проведено сопоставление параметров слоя свечения на длине волны 557.7 нм (интенсивность, температура, высота максимума) с использованием данных наземного и спутникового инструментов при помощи методов, разработанных в рамках докторской работы.

Показано влияние ВСП на высотное распределение восстановленной I557.7, рассчитанной по спутниковым данным SABER, и на другие параметры атмосферы (температура, эмиссия гидроксила).

Методы исследования

Данные о параметрах атмосферы Земли получены с помощью наземных инструментов Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН: интерферометра Фабри — Перо (ИФП) и спектрометра SATI. В качестве спутниковых инструментов использовались SABER/TIMED и MLS/Aura. Фоновые климатологические сведения о параметрах атмосферы получены с использованием модели NRLMSIS 2.0. Для расчета параметров слоя свечения атмосферы на длине волны 557.7 нм (не содержащихся в модели) использовались современные представления о кинетике химических реакций в газе. Разработка программного комплекса для загрузки, обработки и фильтрации по времени и пространству исследуемых данных, моделированию и синтезу ненаблюдаемых напрямую параметров совершалась с использованием языка Python и его специализированных библиотек.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием надежных сведений об атмосфере, полученных спутниковыми и наземными инструментами, согласованностью результатов с работами других авторов, применением проверенных методов обработки и анализа данных и использованием корректного математического аппарата. Вариации временной динамики I557.7 по данным наземных и спутниковых средств хорошо коррелируют друг с другом, что является признаком достоверности получаемых данных.

Научная и практическая значимость

Разработанный метод может применяться в дальнейшем для построения глобальных карт пространственного распределения I557.7, исследования морфологии этого свечения атмосферы, исследований временных и пространственных распределений температуры и циркуляции верхней атмосферы. Показано, что высокая корреляция I557.7, восстановленной из спутниковых данных и регистрируемой наземным инструментом, может быть использована для калибровки наземных средств по спутниковым и модельным данным.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложен оригинальный метод расчета интенсивности свечения атомарного кислорода 557.7 нм, отличительной особенностью которого является использование спутниковых измерений SABER и общепринятых фотохимических моделей.
2. Выполненное в работе сопоставление температуры области мезопаузы по данным наземного и спутникового инструментов указывает на необходимость корректировки

фотохимических моделей свечения атомарного кислорода и гидроксила для использования со спутниковыми данными. Сопоставление выполнялось при помощи минимизации среднеквадратичных отклонений разности временных рядов температур, используя высоту свечения как параметр.

3. Среднемноголетние сезонные вариации параметров атмосферы в слое свечения 557.7 нм над Восточной Сибирью по данным различных инструментов и предложенного метода демонстрируют согласованное поведение в зимне-весенний период и слабую согласованность в летне-осенний период. Наблюдаемый апрельский минимум среднемесячных значений интенсивности слоя свечения 557.7 нм не соответствует результатам, получаемым по данным эмпирической модели NRLMSIS, где наблюдается локальный максимум.

4. Данные о вертикальной структуре эмиссионных слоев, полученные по предложенной в работе методике на основе многолетних спутниковых наблюдений, подтверждают, что мажорные внезапные стратосферные потепления вызывают возмущения, которые приводят к значительным изменениям температуры, интенсивности и высоты максимума свечения слоев атомарного кислорода и гидроксила с периодом около 10 дней.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно либо при его определяющем участии. Выносимые на защиту положения основаны на результатах исследований, проведенных автором самостоятельно либо при его определяющем участии. Автор принимал прямое участие в получении, обработке, научном анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на симпозиумах и конференциях:

- V Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2018);
 - Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2019, 2022);
 - Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике и Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2019, 2022);
 - Международный симпозиум по атмосферной радиации и динамике (Санкт-Петербург, 2021);
 - Международная конференция и Школа молодых ученых «Климатические риски и космическая погода», посвященная памяти Н. К. Кононовой (Иркутск, 2021);
 - Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Москва 2021, 2023).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных изданиях, из которых 4 включены в список ВАК или входят в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science.

Соответствие паспорту специальности

Задачи диссертационной работы и полученные результаты соответствуют областям исследований специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате» в части пунктов 1, 2, 3 и 4.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, включая 50 рисунков. Список цитируемой литературы состоит из 123 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена актуальность темы диссертации, сформулирована постановка задачи, отмечаются научная новизна, достоверность и практическая ценность полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В **первой главе** описываются структура атмосферы, механизмы формирования слоев собственного свечения атмосферы, а также методы и модели для исследования верхней атмосферы. Рассматривается текущее состояние проблемы по сопоставлению данных, полученных различными инструментами и моделями.

В **второй главе** перечислены источники используемых данных, описывается разработанный программный комплекс для загрузки, обработки и визуализации спутниковых данных. Проведено сопоставление данных спутниковых инструментов SABER/TIMED и MLS/AURA. Данные SABER признаны более информативными с точки зрения использования в настоящей работе.

В **третьей главе** представлен метод расчета интенсивности свечения атомарного кислорода на длине волны 557.7 нм (I557.7) из данных SABER.

SABER проводит глобальные измерения параметров атмосферы с помощью 10-канального широкополосного инфракрасного радиометра методом сканирования лимба Земли в спектральном диапазоне от 1.27 до 17 мкм [Russel et al., 1994]. Эти измерения используются для получения вертикальных профилей кинетической температуры, давления, геопотенциальной высоты, относительной концентрации O_3 (озон), интенсивности эмиссии для OH (гидроксила) и концентрации O_2 (молекулярный кислород).

Спутниковый инструмент SABER не ведет прямые измерения эмиссии 557.7 нм, но при этом наблюдает такие параметры атмосферы, как эмиссия гидроксила, плотность атмосферы, температура и другие. Для лучшего понимания возникновения эмиссии 557.7 нм в атмосфере и ее взаимосвязи с другими параметрами атмосферы необходимо подробнее рассмотреть фотохимические процессы и реакции, связанные с атомарным кислородом. Излучение на длине волны 557.7 нм возникает в результате перехода в возбужденном атоме кислорода $O(^1S - ^1D)$. Возбужденный атом кислорода $O(^1S)$ с энергией 4.2 эВ получается в результате тройных соударений при участии атомарного кислорода (механизм Барта):



Зная концентрацию атомарного кислорода в единице объема и скорость течения (1), (2), можно оценить количество фотонов 557.7 нм (3), исходящих из единицы объема в единицу времени.

Свечение гидроксила также связано с химией атомарного кислорода через озон посредством реакции



При этом озон получается из атома кислорода посредством реакции тройных соударений



Для определения значения $[O]$ в ночное время при помощи свечения гидроксила Mlynczak et al. [2013] предположили, что выработка озона путем рекомбинации (4) уравновешивается его потерей в результате реакции с атомарным водородом (5). Поэтому наблюдаемая, например, с использованием инструмента SABER интенсивность свечения гидроксила будет прямо пропорциональна скорости его образования и, следовательно, прямо пропорциональна $[O]$.

Для расчета $[O]$ в [Mlynczak et al., 2013] была введена формула, в которой интенсивность свечения гидроксила, измеренная с помощью SABER, определяется следующим образом:

$$V = k_2[O][O_2][M] \left[\frac{f_9}{A_9 + C_9} A_{97} + \frac{f_8}{A_8 + C_8} A_{86} + \frac{f_9}{A_9 + C_9} \frac{A_{98} + C_{98}}{A_8 + C_8} A_{86} \right], \quad (6)$$

где V — наблюдаемая интенсивность объемной эмиссии гидроксила; $[O]$ — концентрация атомарного кислорода; $[O_2]$ — концентрация молекулярного кислорода; $[M]$ — плотность атмосферы. Данное уравнение позволяет получать атомарный кислород по методике, описанной в [Good, 1979]. Уравнение (6) можно свести к квадратному уравнению для $[O]$ с коэффициентами, содержащими наблюдаемую с помощью SABER интенсивность свечения гидроксила, а также кинетические и спектроскопические параметры, значения которых представлены в таблице 1. Однако в более поздней публикации [Mlynczak et al., 2018] были приведены новые коэффициенты для уравнения (6), и в данной диссертационной работе представлены результаты для двух версий, которые также отображены в таблице 1. Кроме того, были использованы сведения об атомарном кислороде из набора данных SABER, полученных по методике [Panka et al., 2018].

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (5)

| Коэффициент | Mlynczak et al., 2013 | Mlynczak et al., 2018 |
|----------------|---|---|
| f_9 | 0.4444 | 0.47 |
| f_8 | 0.2756 | 0.34 |
| A_9 | 215.05 s^{-1} | 215.05 s^{-1} |
| A_8 | 178.06 s^{-1} | 178.06 s^{-1} |
| A_{98} | 20.05 s^{-1} | 20.05 s^{-1} |
| A_{97} | 118.35 s^{-1} | 118.35 s^{-1} |
| A_{86} | 117.21 s^{-1} | 117.21 s^{-1} |
| $k_9^{O_2}$ | $1.05 \times 10^{-11} \exp(220/T) \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $2.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| $k_9^{N_2}$ | $3.36 \times 10^{-13} \exp(220/T) \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $3.36 \times 10^{-13} \exp(220/T) \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| k_9^O | $5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $3 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| C_9 | сумма $k_9^{O_2}[O_2]$, $k_9^{O_2}[N_2]$, $k_9^O[O]$ | сумма $k_9^{O_2}[O_2]$, $k_9^{O_2}[N_2]$, $k_9^O[O]$ |
| $k_8^{O_2}$ | $8 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $4.8 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| $k_8^{N_2}$ | $7 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $7 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| k_8^O | $5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $1.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| C_8 | сумма $k_8^{O_2}[O_2]$, $k_8^{N_2}[N_2]$, $k_8^O[O]$ | сумма $k_8^{O_2}[O_2]$, $k_8^{N_2}[N_2]$, $k_8^O[O]$ |
| $k_{98}^{O_2}$ | $4.2 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $4.2 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| $k_{98}^{N_2}$ | $4 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ | $4 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ |
| C_{98} | сумма $k_{98}^{O_2}[O_2]$, $k_{98}^{N_2}[N_2]$ | сумма $k_{98}^{O_2}[O_2]$, $k_{98}^{N_2}[N_2]$ |
| k_2 | $6 \times 10^{-34} (300/T)^{2.4}$ | $6 \times 10^{-34} (300/T)^{2.4}$ |

Для сравнения параметров атмосферы, полученных с помощью спутниковых и наземных инструментов, важно выбрать моменты времени, когда оба инструмента наблюдают один и тот же объем атмосферы. SABER проводит лимбовые измерения и получает профили параметров атмосферы в глобальном масштабе. Для сравнения были выбраны моменты времени, когда спутник проводил наблюдения в области диаметром 1400 км, в центре которой находится интерферометр Фабри — Перо KEO Scientific “Arinae”, расположенный в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН вблизи п. Торы (Россия, Бурятия, 52° с.ш., 103° в.д.). Поскольку наблюдения ИФП проводятся в темное время суток, для анализа были выбраны профили SABER, полученные при солнечно-зенитных углах более 94° .

Рассчитанные по формуле (6) значения $[O]$ для исследуемой области, отражающие сезонное поведение атомарного кислорода, представлены на рис. 1. Вертикальная ось — высота, горизонтальная ось — время, цвет — концентрация атомарного кислорода. На данном рисунке показана динамика высотных профилей, рассчитанных по двум наборам коэффициентов [Mlynczak et al., 2013, 2018], а также представлен результат визуализации $[O]$, полученный по методике [Panka et al., 2018].

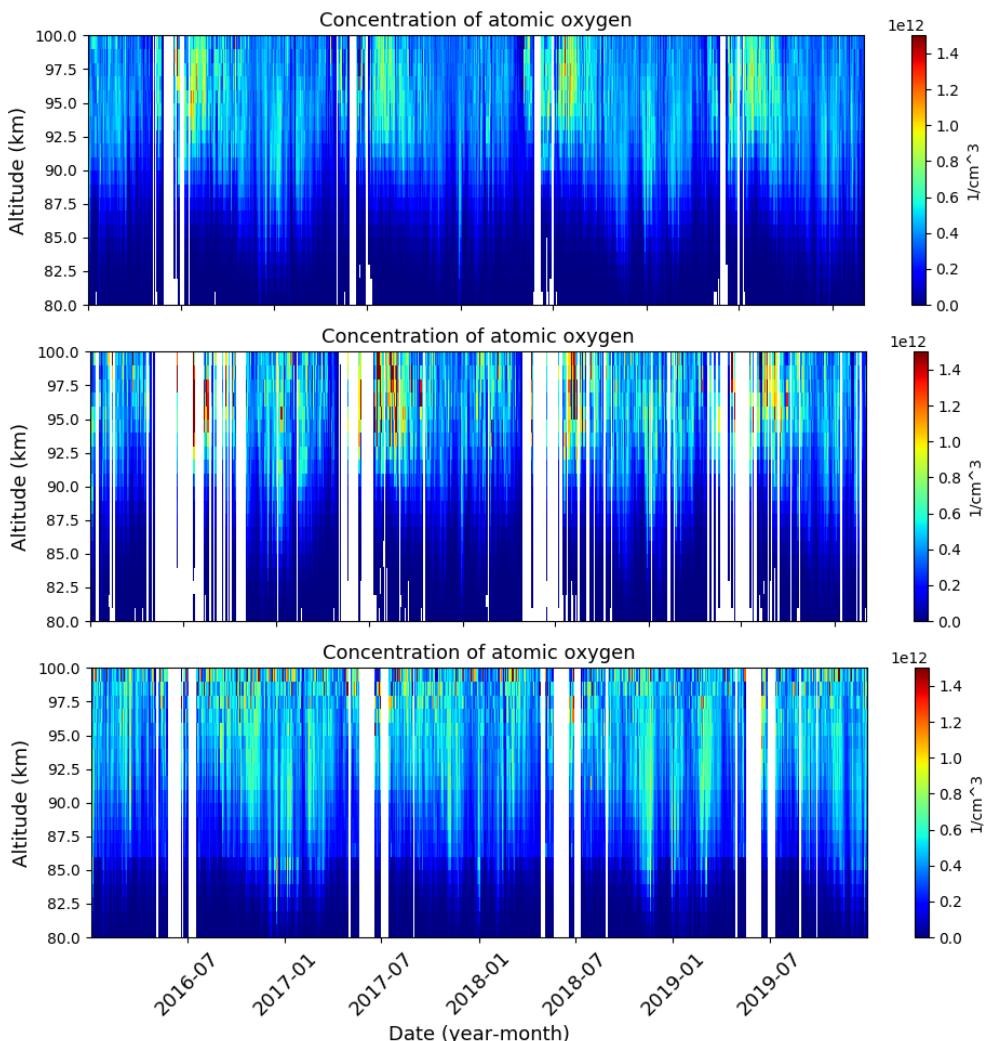


Рисунок 1. Динамика высотного профиля $[O]$ за 2016–2020 гг. над ГФО (Торы) в ночное время. На верхней панели представлены данные, рассчитанные по [Mlynczak et al., 2013]; на средней панели представлены данные, рассчитанные по [Mlynczak et al., 2018]; на нижней панели представлены данные, полученные с использованием набора данных из [Panka et al., 2018]

Длинные пробелы в данных на средней панели рис. 1 по сравнению с данными на верхней панели обусловлены особенностями метода, описанного в [Mlynczak et al., 2018]. Некоторые решения квадратного уравнения восстановления $[O]$ при заданных входных параметрах не существуют. Пробелы в данных на нижней панели по сравнению с данными на верхней панели обусловлены внутренними ограничениями исходного набора данных. Далее будут рассматриваться коэффициенты [Mlynczak et al., 2013] для восстановления $[O]$ из спутниковых данных SABER, так как необходимы сведения о распределении интенсивности 557.7 нм в летний период времени.

При известной концентрации атомарного кислорода можно провести расчет объемной I557.7 (VER — volume emission rate) используя формулу из работы [Gao et al., 2012]:

$$V_{557.7} = A_{557.7}[O(^1S)] = \frac{A_{557.7}k_1[O]^3[M]}{\{(A(^1S) + k_5[O_2])(C^{(0)} + C^{(1)}[O] + C^{(2)}[O_2])\}}, \quad (7)$$

где $V_{557.7}$ — объемная I557.7; M — плотность атмосферы; k_1 — коэффициент скорости рекомбинации трех тел; k_5 — коэффициент гашения $O(^1S)$ кислородом; $A_{557.7}$, $A(^1S)$ — коэффициенты Эйнштейна. Значения этих коэффициентов представлены в работе [Gao et al., 2012].

На рис. 2 показаны профили объемной I557.7, усредненные за весь рассматриваемый период. Профили синтезированы на основе расчетных данных профилей атомарного кислорода.

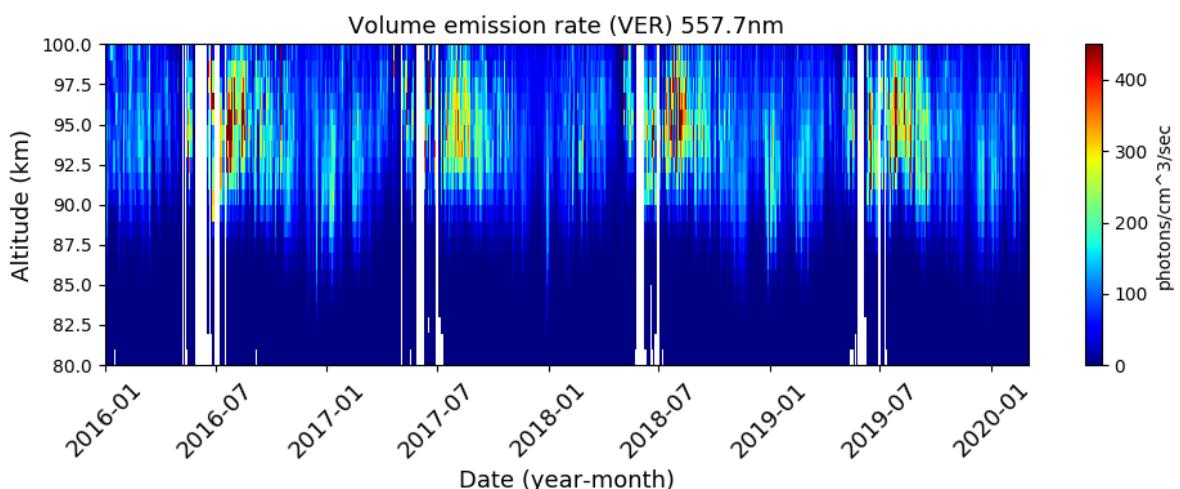


Рисунок 2. Динамика высотного профиля объемной I557.7 за 2016–2020 гг. над ГФО (Торы) в ночное время

Таким образом, наличие сведений о параметрах атмосферы, перечисленных выше, позволяет рассчитать синтезированную объемную I557.7.

В первой части четвертой главы сопоставляются интенсивности 557.7 нм, полученная наземным интерферометром Фабри — Перо (ИФП) и рассчитанная предложенным методом из спутниковых данных SABER.

Интерферометр Фабри — Перо определяет температуру и скорость ветра по доплеровскому уширению и смещению спектральных линий естественного ночного свечения атмосферы. Используются сведения, полученные при помощи линии 557.7 нм, излучаемой атомарным кислородом в слое толщиной около 10 км на высоте 90–100 км над поверхностью Земли. В отличие от SABER, наземный интерферометр регистрирует свечение всего слоя, без разделения по высотам, поэтому получаемые характеристики (интенсивность свечения, температура, ветер), по сути, являются некими интегральными значениями, усредненными

по всему светящемуся слою. Методика определения параметров атмосферы с помощью ИФП представлена в работе [Vasilyev et al., 2017].

Для того чтобы получить интегральную I557.7, необходимо рассчитать интеграл объемной I557.7 по высоте, при этом интеграл берется для высот 80–102 км, чтобы получить корректные значения I557.7 для сравнения наземных и спутниковых наблюдений. Интегральная интенсивность, полученная по данным SABER, и интенсивность, наблюданная интерферометром, показывают хорошее согласие, особенно зимой и весной (рис. 3).

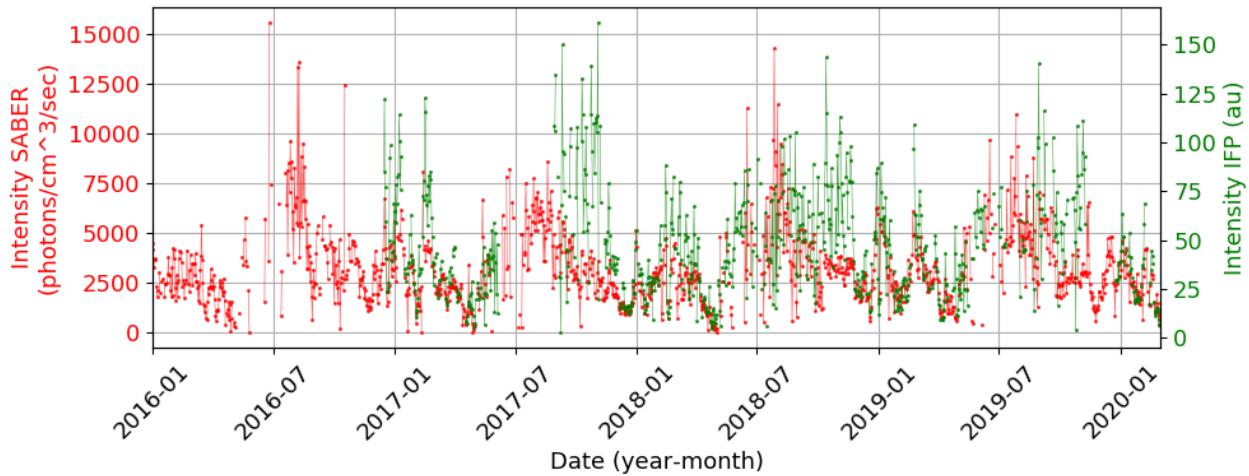


Рисунок 3. Временная динамика I557.7, наблюданной с помощью интерферометра Фабри — Перо (зеленый), и I557.7, интегрированной по высоте, рассчитанной по данным SABER (красный) за 2016–2020 гг. над ГФО (Торы) в ночные времена

Интенсивность I557.7, наблюданная с помощью ИФП, выражена в условных единицах. На данном этапе не проводилась калибровка интенсивности, чтобы привести ее к значениям потока фотонов, но при этом учитывался фон. Таким образом, интенсивность в условных единицах — это I557.7, которая достаточно хорошо совпадает с реальным потоком фотонов 557.7 нм.

Чтобы правильно сравнить параметры атмосферы, полученные из различных источников данных, необходимо привести их к одному параметру и синхронизировать. Интегральная интенсивность свечения, наблюданная наземным инструментом, не может быть преобразована в высотный профиль, поэтому интенсивность свечения, полученная по данным SABER и результатам моделирования, для сравнения с наземными средствами должна быть приведена к одинаковым единицам измерения. Полученный высотный профиль объемной I557.7 для дальнейшего сопоставления с данными наземных инструментов необходимо перевести в рэлеи (10^{-6} фот/($\text{см}^2 \text{ с}$)). Для этого можно использовать следующее выражение:

$$R = 10^{-6} \times \sum_i^N I_i \Delta h \times 10^5 = I_s \Delta h \times 10^{-1}, \quad (8)$$

где I_i — объемная интенсивность свечения (фот/($\text{см}^3 \text{ с}$)) для каждого уровня i ; N — количество уровней в высотном профиле; Δh — толщина слоя в километрах. Подобные преобразования встречаются, например, в работе [Baker, Romick, 1986]. Толщина слоя Δh в данной случае — это диапазон высот 85–100 км. В результате получаем интегральную I557.7 в рэлеях.

На рис. 4 сопоставляются вариации интегральной I557.7, синтезированной по данным SABER, и вариации I557.7 по данным ИФП. Приведены средненочные значения

интенсивности, усредненные за период с 2017 по 2021 г. Результаты измерений интенсивности с помощью ИФП приведены в относительных единицах, поскольку калибровки прибора для оценки интенсивности светового потока не проводилось. Относительные единицы интенсивности, наблюдаемой ИФП, можно перевести в рэлеи, используя данные SABER за те периоды времени, в которые вариации интенсивностей имеют наибольшее сходство.

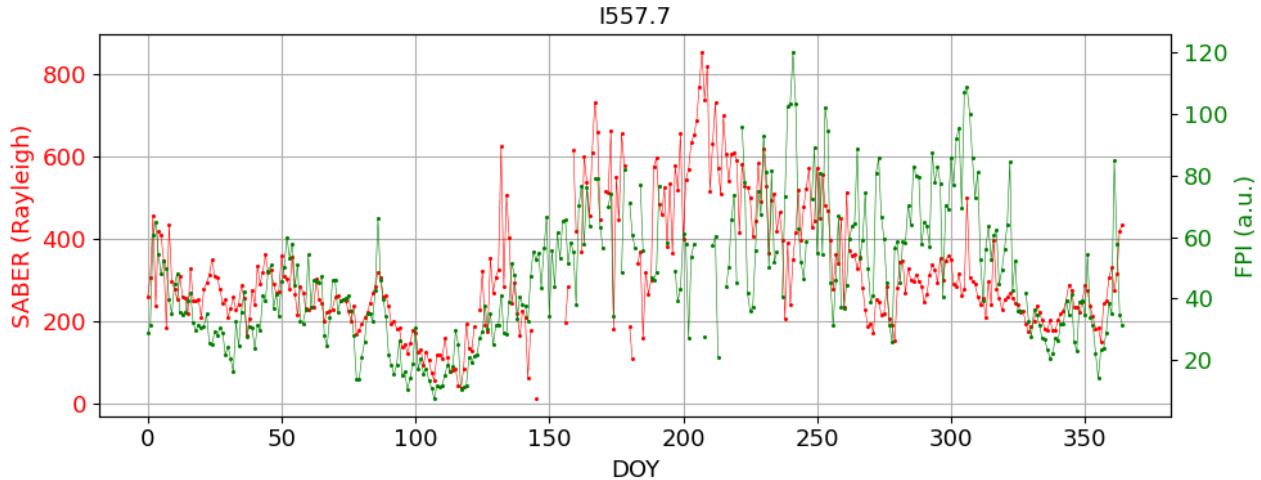


Рисунок 4. Среднегодовые значения I557.7 за период 2017–2021 гг. по данным SABER (красные) и ИФП (зеленые)

Диаграмма рассеяния для рядов значений интенсивности по данным ИФП и SABER для дней года с 0 по 125 и с 325 по 365 (время наилучшего сходства) приведена на рис. 5. Несмотря на существенную дисперсию, положительная корреляция двух исследуемых рядов прослеживается довольно отчетливо, коэффициент корреляции рядов по Пирсону равен 0.78 при использовании скользящей средней с окном 7 дней.

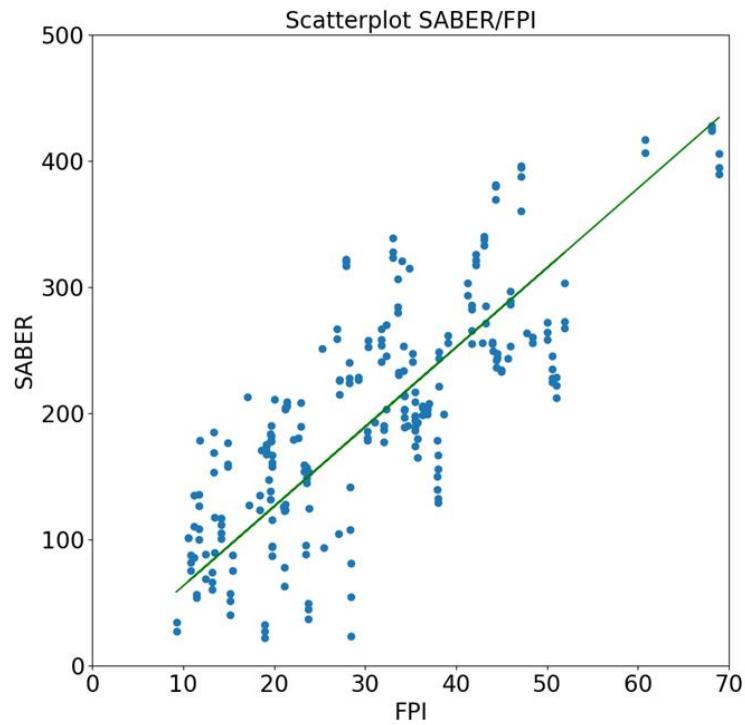


Рисунок 5. Диаграмма рассеяния (синие точки) и линия регрессии (зеленая линия) для I557.7 нм по данным ИФП и SABER (с использованием скользящей средней с окном 7 дней)

Метод определения интенсивности из интерферограмм предполагает вычитание фона [Vasilyev et al., 2017], поэтому для предлагаемой калибровки интерферометра можно считать, что взаимосвязь двух интенсивностей не только линейная, но и без смещения нуля. Линия линейной регрессии двух наборов данных, проходящая через начало координат, также приведена на диаграмме рассеяния. Тангенс угла наклона этой линии (6.3 Рл/отн. ед.) далее будет использоваться для перевода относительных единиц I557.7, полученной интерферометром, в релеи. Ниже приведена таблица 2 коэффициентов, полученных при различных окнах скользящей средней, а также без использования скользящей средней.

Таблица 2. Коэффициенты, полученные при различных окнах скользящей средней

| Окно | Наклон | Коэф. кор. |
|------------------------|--------|------------|
| Без скользящей средней | 6.32 | 0.61 |
| 3 дня | 6.30 | 0.72 |
| 5 дней | 6.30 | 0.76 |
| 7 дней | 6.30 | 0.78 |
| 9 дней | 6.33 | 0.75 |

Во второй части главы 4 проводится сравнение данных о температуре верхней атмосферы, полученных при помощи SABER и ИФП. В первом подходе реализуется грубая калибровка температуры, полученной ИФП, по температуре, измеряемой SABER. В предположении, что температуры связаны линейным образом, методом наименьших квадратов определяются коэффициенты связи температур.

Используются сведения о температуре верхней атмосферы за 2017–2018 гг. Идея заключалась в том, чтобы, варьируя высоту, на которой получена температура по данным SABER, и коэффициенты линейной зависимости, минимизировать разницу сезонных колебаний температур, регистрируемой ИФП и наблюдаемой SABER на выбранной высоте. Линейная зависимость температур выглядит следующим образом:

$$T_i^h = aT_i + b, \quad (9)$$

где T_i — температура ИФП; T_i^h — температура, полученная SABER на высоте h ; a и b — искомые коэффициенты; i — момент времени. Коэффициенты этой линейной зависимости могут быть определены при помощи метода наименьших квадратов (МНК). Задача заключается в нахождении минимального значения суммы квадратов функции ошибки для варьирующихся коэффициентов a и b :

$$S(a, b, h) = \sum_{i=1}^n (aT_i + b - T_i^h)^2 \quad (10)$$

В процессе решения данной задачи была получена высота 92 км, для которой сезонный ход температур, полученных SABER, наиболее точно соответствует сезонному ходу температур, полученных интерферометром, а коэффициенты a и b составили 0.99 и –120 соответственно.

Найденные параметры привели к разумным температурам и высоте эмиссии O (1S). Позднее скорректированные данные ИФП были сопоставлены с динамикой нижней атмосферы и достоверно показали наличие реакции на внезапное стратосферное потепление [Zorkaltseva et al., 2020; Zorkaltseva, Vasilyev, 2021].

Поскольку ИФП регистрирует интегральную интенсивность, излучаемую в некотором диапазоне высот, то и наблюдаемая ИФП температура — это также некая интегральная характеристика. Ее можно назвать эффективной температурой T_{eff} , полученной в результате усреднения значений температуры в некотором диапазоне высот внутри слоя свечения атомарного кислорода 557.7 нм с весами, равными интенсивности свечения на определенной высоте:

$$T_{\text{eff}} = \frac{\sum_h T(h) \cdot V_{557.7}(h)}{\sum_h V_{557.7}(h)}, \quad (11)$$

где h — высота; $T(h)$ — температура атмосферы по данным SABER; $V_{557.7}$ — объемная I557.7, синтезированная из данных SABER.

Высотный профиль интенсивности свечения атомарного кислорода, восстановленный по данным SABER, позволяет с помощью (11) получить эффективную температуру и сравнить ее с результатами наземных наблюдений. Поведение этих величин за все время наблюдений над ГФО (Торы) приведено на рис. 6.

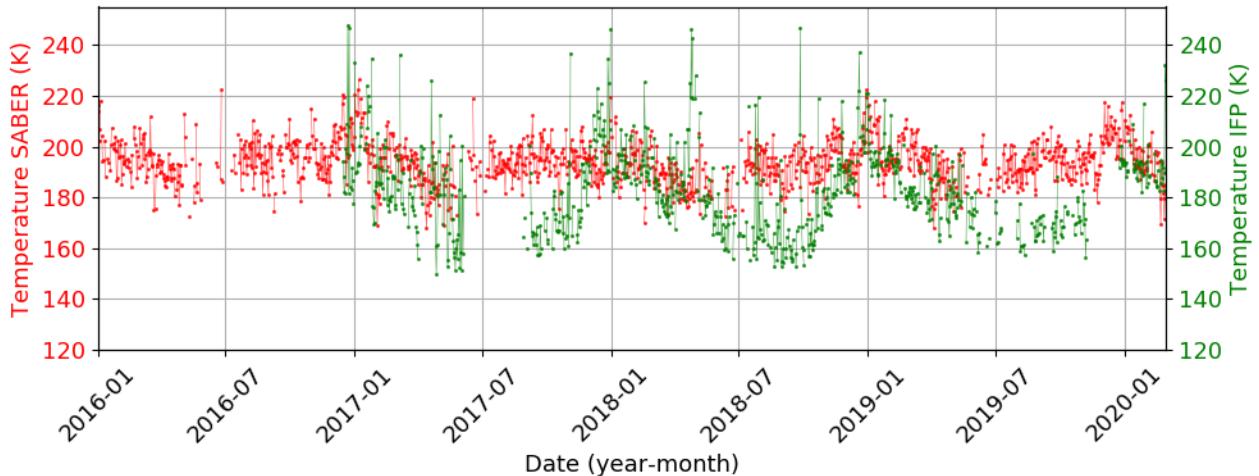


Рисунок 6. Временная динамика температуры, наблюданная с помощью интерферометра Фабри — Перо (зеленый), и эффективной температуры, рассчитанной по данным SABER (красный) за 2016–2020 гг. над ГФО (Торы) в ночное время

Предполагается, что причиной различного сезонного хода температур, полученных разными методами (рис. 6), является некорректная реконструкция $O(^1S)$, а именно неверное положение высоты максимума интенсивности свечения. Для проверки этого предположения использовался метод сравнения двух рядов данных для определения наиболее подходящей высоты максимума. Смещая высотный профиль свечения, полученный по данным SABER, по высоте, будем вычислять для каждого такого смещения новую эффективную температуру (11). Для того чтобы найти наиболее подходящую новую высоту положения максимума свечения, воспользуемся весовой функцией ошибки, вычисляемой на всем периоде наблюдений:

$$D(h) = \sqrt{\frac{\sum_i^N I_i (T_{(\text{FPI})i} - T_{(\text{SABER})hi})^2}{\sum_i^N I_i}}, \quad (12)$$

где I_i — это I557.7; $T_{(FPI)i}$ — температура атмосферы, измеренная с помощью ИФП; $T_{(SABER)hi}$ — эффективная температура атмосферы, рассчитанная по данным SABER по профилю I557.7, максимум которого соответствует высоте h ; индекс i обозначает момент времени проведения наблюдения.

Минимальное значение функции (12) будет означать, что для данной высоты максимума профиля свечения временные вариации температуры, измеренной ИФП, будут максимально точно совпадать с временными вариациями эффективной температуры, определенной по данным SABER. На рис. 7 представлена функция ошибок (12), рассчитанная для сдвигов профиля свечения атомарного кислорода по высоте.

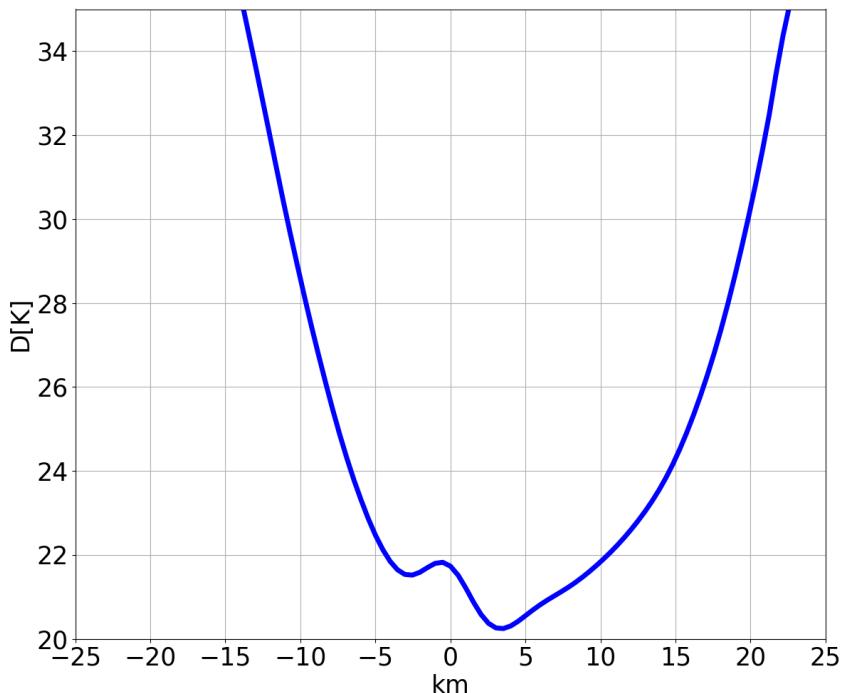


Рисунок 7. График зависимости функции ошибок от смещения по высоте профиля свечения атомарного кислорода

Минимум весовой функции ошибок на рис. 7 приходится на сдвиг по высоте +3 км (~97 км). Сезонное поведение эффективной температуры, полученное с использованием смещенных профилей интенсивности по высоте, лучше соответствует поведению температуры, измеренной интерферометром, — рис. 8. Видно, что отклонения в сезонном ходе температуры для ИФП и SABER появляются в середине лета и осенью, когда температура, полученная по данным ИФП, ниже температуры, полученной по данным SABER.

Лучшее согласие сезонных вариаций температур наблюдается при смещении синтезированного по данным SABER профиля свечения примерно на 3 км вверх. По всей видимости, это означает, что профиль свечения определяется не совсем верно и в действительности эмиссионный слой 557.7 нм лежит выше. По крайней мере, это справедливо для средних широт, где расположен ИФП. Кроме того, следует отметить, что локальные быстрые (несезонные) изменения температуры, полученные с помощью двух инструментов, находятся в противофазе.

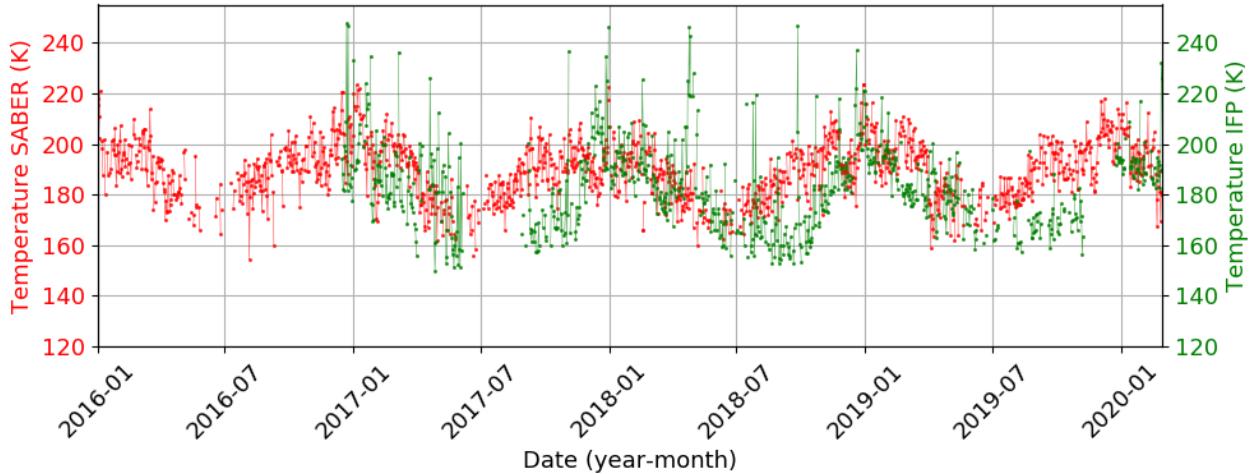


Рисунок 8. Динамика температуры, наблюдаемой интерферометром Фабри — Перо (зеленый), и динамика эффективной температуры, рассчитанной по данным SABER (красный) со сдвигом высоты профиля интенсивности за 2016–2020 гг., над ГФО Торы в ночное время

Причиной этих вариаций может быть вертикальная динамика профиля I557.7, обусловленная факторами, которые невозможно учесть по данным SABER. Например, изменение концентрации атомарного кислорода или эффективности механизма Барта вследствие поступления не регистрируемых инструментом SABER химических компонент из нижележащей атмосферы может приводить как к снижению прекурсоров свечения, так и к подавлению самой эмиссии. В работе [Kulikov et al., 2024] предлагается модернизированная фотохимическая модель и обновленные константы для восстановления $[O]$, которые могут повлиять на расчет высоты максимума интенсивности 557.7 нм и на сезонные вариации эффективной температуры, что требует дополнительного исследования.

В пятой главе проведено исследование динамики среднемноголетних сезонных вариаций I557.7 и температуры слоя свечения над Восточной Сибирью по данным наземных и спутниковых наблюдений и модели NRLMSIS 2.0.

Модель NRLMSIS 2.0 разработана коллективом авторов [Emmert et al., 2021] на основе модели NRLMSISE-00. В модели используются данные ракетных и спутниковых измерений, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Модель рассчитывает концентрации He , O , N_2 , O_2 , Ar , H , N , общую массовую плотность, нейтральную температуру на высотах от поверхности Земли до 1000 км.

Спектрограф SATI собран на основе серийно выпускаемых устройств: спектрографа ИСП-51 и камеры ВИДЕОСКАН-285. ИСП-51 ведет измерения в области спектра от 360 до 1000 нм. Как и интерферометр, спектрометр наблюдает интегральную интенсивность свечения. В работе будут использоваться сведения об интенсивности линии 557.7 нм, полученные с этого устройства.

Методика вычисления интенсивности по данным модели NRLMSIS аналогична методике вычисления интенсивности по данным SABER. Концентрации атомарного и молекулярного кислорода брались из данных NRLMSIS 2.0 за период с 2017 по 2021 г. для диапазона высот 80–120 км с шагом 1 км и времененным разрешением 0.25 ч. Синтезированная таким образом интенсивность использовалась для расчета интенсивности в рэлеях с использованием выражения (8) и определения эффективной температуры слоя, взвешенной по интенсивностям в разрезе профиля высот.

Годовой ход среднемесячной ночной интенсивности свечения линии 557.7, полученной по данным SABER, ИФП и модели NRLMSIS за период с 2017 по 2021 г. над югом Восточной Сибири, приведен на рис. 9. Сезонный ход интенсивности для различных инструментов практически одинаков от начала зимы до начала лета и различен летом и

осенью. Следует отметить, что, за исключением апрельского минимума, в остальные моменты времени модельная интенсивность достаточно хорошо соответствует среднемесячным значениям, полученным интерферометром, существенные различия видны в июне и в ноябре. Кроме того, интенсивность, полученная при помощи модели, имеет локальный максимум весной, в апреле, там, где по данным всех рассматриваемых инструментов наблюдается глобальный минимум интенсивности.

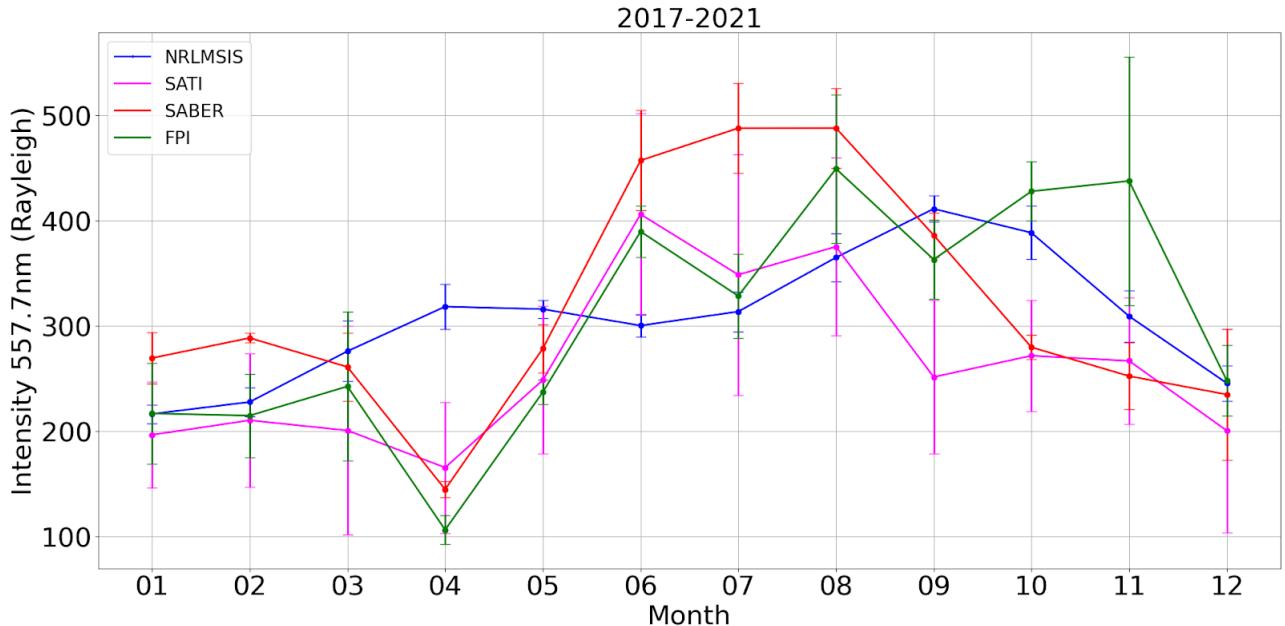


Рисунок 9. Усредненные по месяцам интенсивности в период 2017–2021 гг. по данным SABER (красная линия), ИФП (зеленая линия), модели NRLMSIS (синяя линия), SATI (фиолетовая линия) и их среднестатистические отклонения

В целом годовой ход эмиссии 557.7 нм и температуры мезопаузы над югом Восточной Сибири укладывается в общепринятые представления о поведении этих параметров над средними широтами [Brasseur, Solomon, 2005]. Вариации I557.7 по данным инструментов отличаются от вариаций, полученных из данных модели NRLMSIS, особенно это заметно в апреле. Возможно, это связано с широтной особенностью формирования I557.7 или климатическими изменениями, не учтываемыми моделью NRLMSIS.

Летний июньский максимум свечения по данным SABER может быть объяснен тем, что в верхней атмосфере во время летних лимбовых наблюдений вблизи терминатора остается существенным влияние освещенной солнцем атмосферы, которое не удается до конца устранить из высотных профилей температуры и атмосферных компонент деконволюцией. Другая причина расхождений может заключаться в том, что фотохимические процессы не успевают прийти в стационарное течение после заката, а потому используемые для синтеза интенсивности фотохимическая модель и исходные спутниковые данные некорректно отражают реальное состояние светящейся области мезопаузы.

Наличие осеннего максимума интенсивности в данных интерферометра и его отсутствие в данных SABER объяснить довольно сложно. Вероятно, существует влияние каких-либо дополнительных химических процессов в области мезопаузы, которые не могут быть учтены на основе рассматриваемой в данной работе информации, предоставляемой SABER. При этом следует отметить, что результаты моделирования при помощи NRLMSIS предполагают наличие осеннего максимума интенсивности.

Наблюданное расхождение интенсивностей по данным двух наземных инструментов летом и осенью может быть объяснено следующим образом. Лето и осень — это сезоны, в которые в месте проведения наблюдений наиболее часто возникают туманы и облачность.

При подготовке временных рядов для данных интерферометра выбирались интервалы времени, в которые поле облачности в регионе при проведении наблюдений отсутствовало. Для этого использовался алгоритм, изложенный в работе [Подлесный и др., 2022]. Для временных рядов спектрометра такой подготовки данных перед усреднением не проводилось. В результате этого сходство вариаций от месяца к месяцу в летне-осенний период для интерферометра и спектрометра осталось, но абсолютные значения интенсивности для спектрометра стали существенно ниже (см. рис. 9, месяцы с 7 по 12).

Ниже на рис. 10 представлен годовой ход среднемесячной ночной эффективной температуры в области мезопаузы, полученной по данным ИФП, SABER и NRLMSIS за 2017–2021 гг.

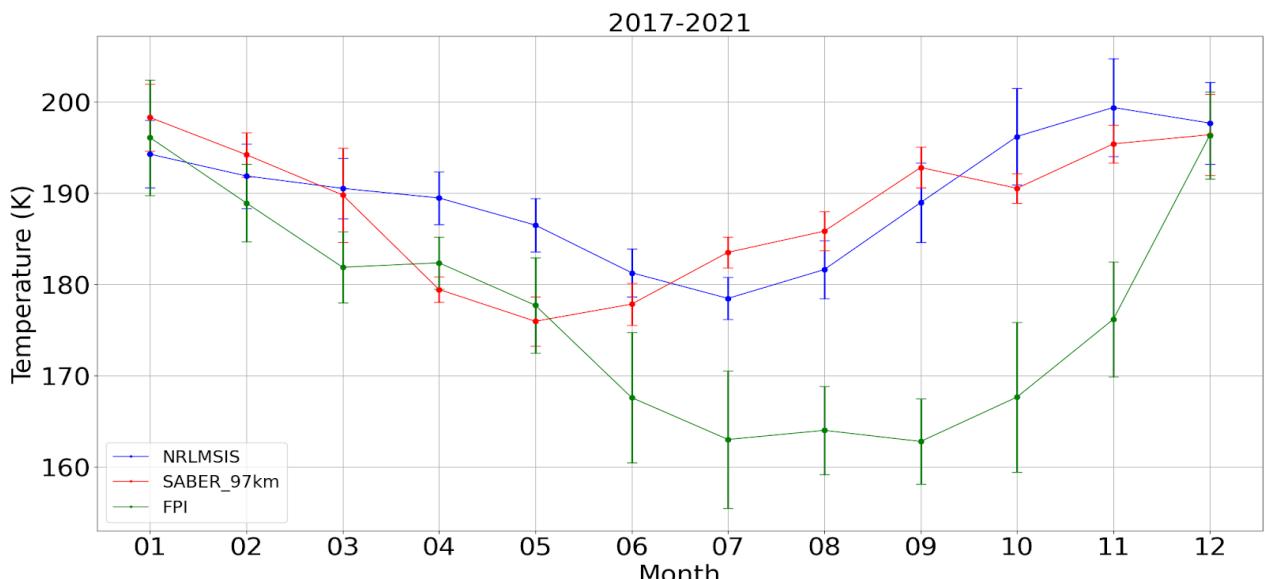


Рисунок 10. Среднемесячные значения эффективной температуры и среднестатистические отклонения в период 2017–2021 гг. по данным SABER (красный), ИФП (зеленый) и модели NRLMSIS (синий)

Можно предположить, что особенность поведения температуры в зимне-весенний период года обусловлена влиянием процессов, развивающихся в нижележащих слоях атмосферы. Для зимы характерна высокая повторяемость внезапных стратосферных потеплений, которые зарождаются и активно развиваются над регионом, где получены обсуждаемые результаты. Влияние этих процессов может быть причиной значительных вариаций средненочной температуры и соответствующего замедления падения среднемесячной температуры [Zorkaltseva, Vasilyev, 2021].

Летне-осенние расхождения в температурах на рис. 10 косвенно могут быть обусловлены различием поведения интенсивности в этот период для спутникового и наземного инструментов, поскольку эффективная температура вычисляется с использованием высотного профиля эмиссии 557.7 нм. Следует отметить, что температура, полученная из модельных данных для этого периода, очень хорошо совпадает с результатами спутниковых наблюдений.

В шестой главе представлено исследование особенностей поведения температуры и интенсивности 557.7 нм, полученных по наземным и спутниковым данным, во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП).

В данной главе используются данные инфракрасного спектрографа Shamrock, который установлен на оптическом полигоне (ОП) «Маймага» (63.04° с.ш., 129.51° в.д.) в Республике Саха (Якутия). Спектрограф регистрирует полосы гидроксила OH(3,1) в далекой инфракрасной области (около 1.5 мкм), предоставляя температуру атмосферы на высотах около 80–85 км.

Для оценки влияния ВСП на слои свечения гидроксила (OH) и атомарного кислорода (O) был применен композитный анализ. Для этого данные ИФП, инфракрасного спектрографа Shamrock и радиометра SABER были усреднены методом наложенных эпох относительно дня с максимальной температурой (центральная дата) во время ВСП (средняя температура вдоль 80° с.ш. на высоте 10 гПа) в диапазоне ± 15 дней. Количество ВСП, зарегистрированных в период 2003–2023 гг. по данным наземных инструментов, составило 5 для ИФП, который работает с 2017 г., и 15 для спектрографа Shamrock. Спутниковый радиометр SABER предоставил более широкий набор данных — 17 событий ВСП.

Рисунок 11 иллюстрирует, что влияние эффектов ВСП на усредненные температуры слоя свечения атмосферы, измеренные наземными инструментами, незначительно. Над ОП «Маймага» наблюдается высокая межгодовая изменчивость температуры, что затрудняет идентификацию эффектов, связанных с ВСП (рис. 11, слева). Данные ИФП (рис. 11, справа) показывают более отчетливую изменчивость температуры, но малое количество наблюдений ограничивает возможность сделать подробные выводы.

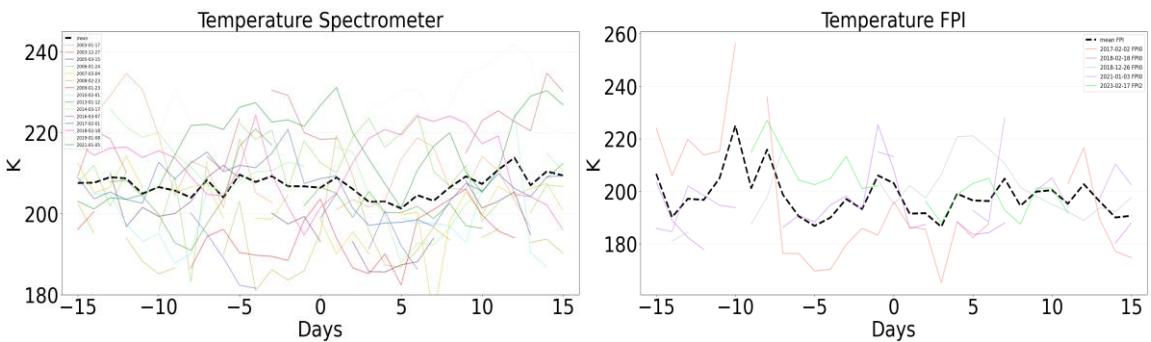


Рисунок 11. Усредненные температуры, полученные по данным спектрометра (слева) и ИФП (справа) во время ВСП (день 0 — максимум ВСП)

На рис. 45 показан композит I557.7 по данным ИФП во время ВСП.

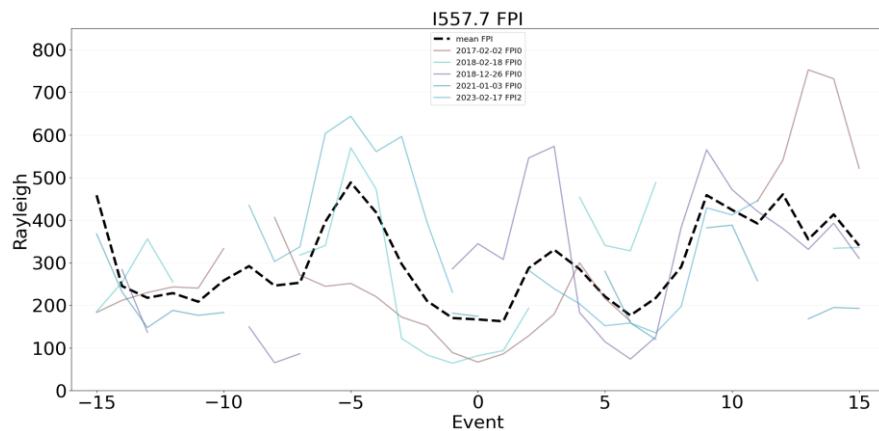


Рисунок 12. Усредненные I557.7, полученные по данным ИФП. Пунктирная черная линия показывает среднюю I557.7 по годам

Малозаметный эффект в результатах, полученных наземными инструментами, связан, по всей видимости, с тем, что они регистрируют интегральные характеристики, которые не отображают влияние ВСП на высотное распределение параметров атмосферы, поэтому для более детального анализа были использованы спутниковые данные.

SABER предоставляет профили параметров атмосферы с вертикальным разрешением 0.4 км в диапазоне высот 40–100 км. На основе данных SABER слои свечения атомарного кислорода и гидроксила хорошо идентифицируются в профилях интенсивностей (далее VER — объемная скорость эмиссии). VER 557.7 рассчитана из данных SABER по методике,

описанной выше. Слой свечения кислорода 557.7 нм охватывает высоты 85–100 км, причем его максимальная интенсивность приходится примерно на 95 км (рис. 13, вверху слева). Эмиссионный слой гидроксила охватывает высоты 78–95 км, а его максимальная интенсивность соответствует высоте около 85 км (рис. 13, вверху справа).

Чтобы сделать эффекты ВСП более выраженным, мы рассчитали аномалии VER. Для расчета аномалий были подсчитаны средние значения VER с 2003 по 2023 г., которые вычитались из текущих значений VER. Аномалии VER представлены на нижних панелях рис. 13. В эмиссионных слоях возникает квазиволновая структура, характеризующаяся увеличением интенсивности до и после максимума ВСП и заметным затуханием около максимума ВСП (с дня –1 по день +5).

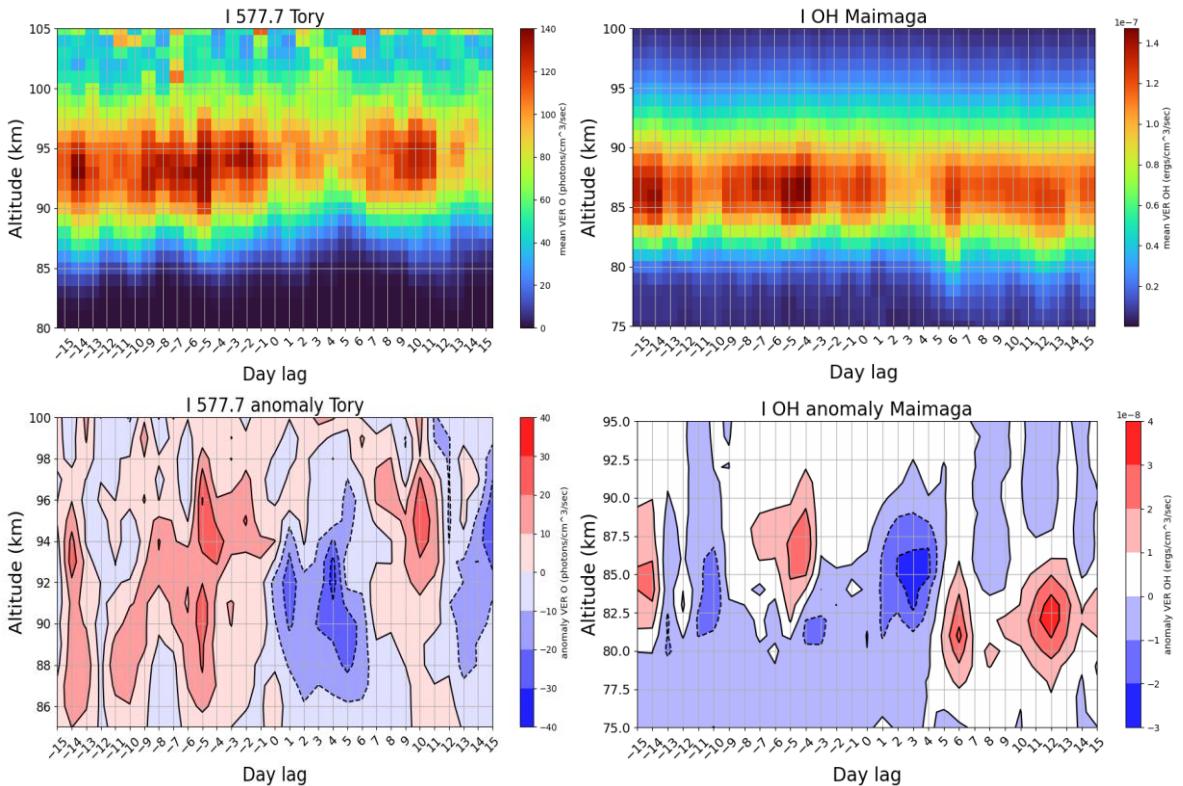


Рисунок 13. Композитный вертикальный разрез интенсивностей (вверху) и их аномалий (внизу) атомарного О, над ГФО Торы (слева) и OH над ОП «Маймага» (справа) по данным SABER

Перед максимумом ВСП повышенные значения VER наблюдаются как для слоя О, так и для OH. В день максимальной температуры ВСП (день 0) и в течение 5–7 дней после него наблюдаются снижение значений VER и утончение слоев свечения атмосферы. Слои начинают восстанавливаться примерно через 5–7 дней после максимума ВСП.

Еще одной особенностью является восстановление эмиссионных слоев после максимума ВСП. Аномалии кислородного слоя становятся положительными в дни +7, +8, что указывает на его восстановление. Далее он поднимается на большую высоту, чем до ВСП. Кроме того, с дня –15 можно наблюдать заметный рост высоты кислородного слоя (рис. 13). Слой эмиссии гидроксила ведет себя иначе. Он восстанавливается на более низкой высоте после максимума ВСП и спускается в последующие дни.

Холодная область мезопаузы расширяется вниз, создавая заметный вертикальный сдвиг. Примечательно, что эти особенности поведения температуры наблюдаются в обеих сибирских обсерваториях, несмотря на их значительное географическую удаленность, что предполагает региональную согласованность в реакции атмосферы на события ВСП.

Рисунок 14 (нижние панели) иллюстрирует поведение аномалий температуры до и после максимума ВСП. Перед максимумом ВСП повышение температуры наблюдается на высотах около 40–50 км, тогда как понижение температуры происходит между ~60–70 км. После максимума ВСП температура заметно понижается на высотах ~40–60 км, в то время как повышение температуры наблюдается на высотах ~60–80 км. Стратосферные потепления часто возникают над Сибирью (примерно за 5–7 дней), прежде чем сместиться на северо-восток к полюсу, что приводит к деформации стратосферного полярного вихря, которая является основной характеристикой событий ВСП.

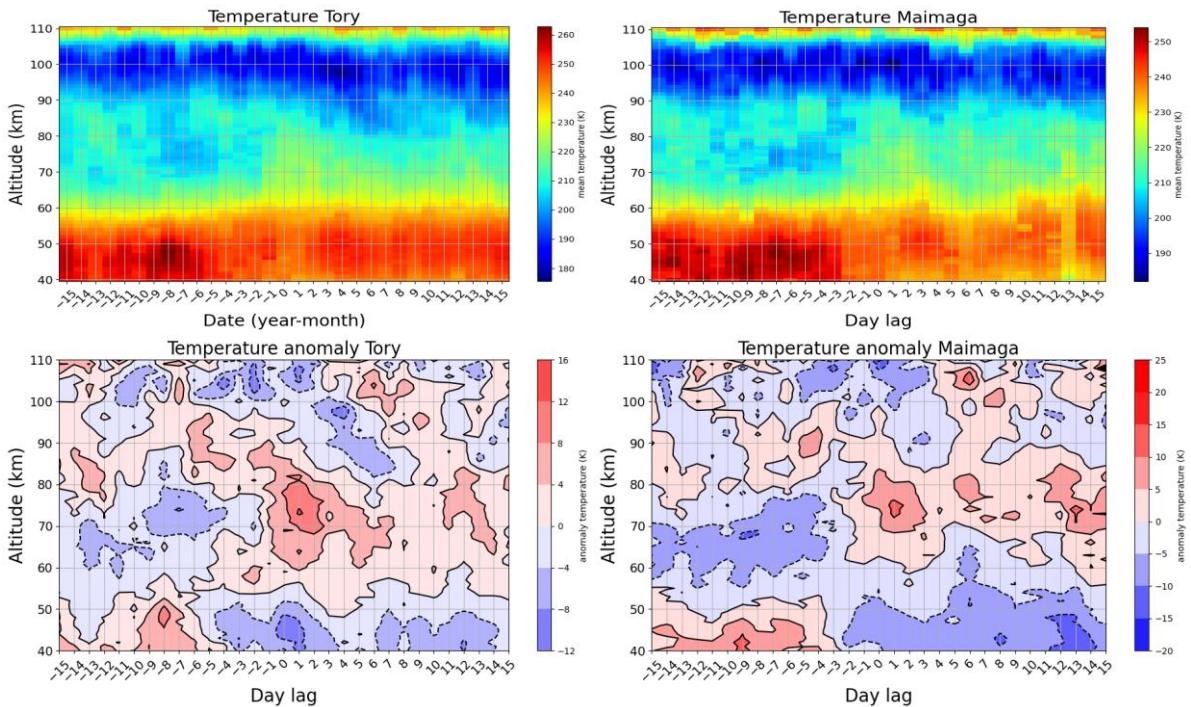


Рисунок 14. Композитный вертикальный разрез температур (вверху) и их аномалий (внизу) атомарного О, над ГФО Торы (слева) и ОН над ОП «Маймага» (справа) по данным SABER

На рис. 14 наблюдается положительная температурная аномалия в стратосфере над обсерваториями со дня –15 по –3 перед мажорным ВСП, в то время как отрицательные температурные аномалии доминируют в мезосфере. Примерно за 3–5 дней до максимума ВСП знак температурной аномалии меняется на противоположный на стратосферных высотах над сибирскими обсерваториями. В максимуме ВСП температура достигает пика в мезосфере (~60–90 км), в то время как термосфера (~100–110 км) демонстрирует охлаждение.

Результаты, полученные наземными инструментами, демонстрируют незначительное влияние ВСП, вероятно, потому, что эмиссионные слои О и OH утончаются, уменьшаются по интенсивности и смещаются по высоте во время этих событий. Кроме того, увеличение максимальной высоты слоев эмиссии примерно на 2 км наблюдалось через 4–5 дней после мажорных ВСП. С учетом больших вертикальных градиентов температуры в этом регионе, даже небольшое смещение высоты эмиссионных слоев может привести к значительным изменениям в интегральных значениях температуры, зарегистрированных наземными инструментами.

ВСП над сибирскими обсерваториями обнаруживаются за 5–7 дней до начала мажорных ВСП. Это наблюдение связано с климатологическими характеристиками развития ВСП. Во время ВСП мезосфера охлаждается, а нижняя термосфера нагревается. В момент максимального развития ВСП знак температурных аномалий над обсерваториями меняется на противоположный: мезосфера демонстрирует положительную аномалию, тогда как нижняя термосфера и стратосфера показывают отрицательные аномалии. Нагрев мезосферы

сопровождается уменьшением VER. Слои свечения атмосферы O и OH истончаются, уменьшаются по интенсивности и смещаются по высоте во время событий ВСП, что согласуется с работой [Gao et al., 2011].

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Создан программный комплекс для загрузки, обработки и визуализации спутниковых данных (MLS/Aura, SABER/TIMED).

2. Сопоставлены данные спутниковых инструментов MLS/Aura и SABER/TIMED для возможности исследования слоя свечения атомарного кислорода. В результате сопоставления получено, что наиболее подходящим устройством для проведения сравнений является SABER/TIMED, поскольку его замеры в ограниченной области на поверхности Земли в Восточной Сибири более равномерно распределены по локальному времени для наземных устройств.

3. Разработан алгоритм расчета интенсивности свечения атомарного кислорода 557.7 нм по данным о физико-химическом составе мезосфера — нижней термосфере, полученном с помощью спутника SABER/TIMED и простых фотохимических моделей, отражающих производство атомарного кислорода и динамику концентрации его возбужденного состояния $O(^1S)$.

4. Проведена калибровка интенсивности свечения, полученной интерферометром Фабри — Перо, с использованием сопоставления пересчитанной в РЛ интегральной интенсивности, полученной по данным SABER, с относительными единицами интенсивности, полученными ИФП. Зависимость интенсивностей линейная с наклоном 6.322 РЛ/отн.ед., без смещения.

5. Традиционные методы минимизации, используемые для сравнения длинных временных рядов наблюдаемых температур, позволили скорректировать систематическую ошибку температуры, регистрируемой ИФП, с использованием температуры, получаемой SABER на некоторой высоте, в предположении линейной взаимосвязи этих величин и изменения высоты как параметра. Получены масштабный коэффициент (0.99) и смещение (-120 К) линейной взаимосвязи, а также середины диапазона усреднения (92.5 км), которая приблизительно соответствует максимуму слоя свечения атомарного кислорода.

6. Сопоставлены ряды двух наземных инструментов, для одного из которых (ИФП) выполнена коррекция данных с использованием алгоритма расчета процента облачности, а для другого (SATI) эта процедура не проводилась. В результате в летне-осенний период получены более высокие значения интенсивности, регистрируемой ИФП, по отношению к SATI, у которого присутствовала облачность.

7. Сопоставлены интенсивности 557.7 нм и температуры эмиссионного слоя по данным SABER/TIMED, интерферометра Фабри — Перо, спектографа SATI и модели NRLMSIS. Проведено исследование среднемноголетних сезонных вариаций параметров слоя свечения 557.7 нм над Юго-Восточной Сибирью по данным наблюдений различными инструментами и моделирования. Интенсивности и температуры имеют схожее поведение в зимне-весенний период с разбросом в ~ 50 РЛ и ~ 10 К соответственно, в то время как в летне-осенний период разброс составляет ~ 100 РЛ и ~ 25 К соответственно. Значения I_{557.7} в апреле, по данным инструментов, принимают минимум, в отличие от значения, полученного из продукта модели NRLMSIS.

8. Проведено детальное исследование влияния ВСП на изменения в высотном распределении характеристик эмиссионных слоев в мезосфере — нижней термосфере над Сибирью. Результаты, полученные наземными инструментами, демонстрируют незначительное влияние ВСП из-за утончения, уменьшения по интенсивности и смещения по высоте исследуемых эмиссионных слоев во время ВСП. Обнаружено увеличение максимальной высоты слоев эмиссии примерно на 2 км, которое наблюдалось через 4–5 дней после мажорных ВСП. Подтверждено что ВСП обнаруживаются над сибирскими обсерваториями за 5–7 дней до начала мажорных ВСП.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертации:

1. **Saunkin, A.** Study of atomic oxygen airglow intensities and air temperature near mesopause obtained by ground-based and satellite instruments above Baikal Natural Territory / **A. Saunkin**, R. Vasilyev, O. Zorkaltseva // *Remote Sens.* — 2022. — Vol. 14, 112. — DOI: 10.3390/rs14010112.
2. Podlesny, S.V. Comparing methods to estimate cloud cover over the Baikal Natural Territory in December 2020 / S.V. Podlesny, E.V. Devyatova, **A.V. Saunkin**, R.V. Vasilyev // *Solar-Terr. Phys.* — 2022. — Vol. 8, iss. 4. — P. 95–102. — DOI: 10.12737/stp-84202210.
3. Vasilyev, R. Climatology of 557.7 nm emission layer parameters over South-East Siberia, observations and model / R. Vasilyev, **A. Saunkin**, O. Zorkaltseva, M. Artamonov, A. Mikhalev // *Data. Appl. Sci.* — 2023. — Vol. 13, 5157. — DOI: 10.3390/app13085157.
4. **Saunkin, A.V.** Airglow intensity of atomic oxygen 557.7 nm according to satellite and ground-based observations over Eastern Siberia / **A.V. Saunkin**, R.V. Vasilyev, O.S. Zorkaltseva // *Proc. SPIE*. — 2021. — Vol. 11916, 1191682. — DOI: 10.1117/12.2603386.
5. **Saunkin, A.V.** Climatology of atmospheric parameters in mesosphere-lower thermosphere region of the Southern of Eastern Siberia / **A.V. Saunkin**, R.V. Vasilyev, O.S. Zorkaltseva, M.F. Artamonov, A.V. Mikhalev // *Proc. SPIE*. — 2023. — Vol. 12780, 127807E. — DOI: 10.1117/12.2690774.
6. Zorkaltseva, O.S. The study of temperature and night green airglow at mid-latitude in MLT during winter / O.S. Zorkaltseva, R.V. Vasilyev, **A.V. Saunkin**, A.I. Pogoreltsev // *Proc. SPIE*. — 2020. — Vol. 11560, 1156081. — DOI: 10.1117/12.2574914.
7. Medvedeva, I.V. Studying variations in atmospheric constituents over the Baikal Natural Territory from the long-term data of Aura MLS measurements / I.V. Medvedeva, A.V. Tatarnikov, I.K. Edemsky, **A.V. Saunkin** // *Proc. SPIE*. — 2022. — Vol. 12341, 123410P. — DOI: 10.1117/12.2644834.
8. Zorkaltseva, O. Effects of sudden stratospheric warmings on airglow emissions layers over Siberia / O. Zorkaltseva, **A. Saunkin**, R. Vasilyev, G. Gavrilova, M. Artamonov, O. Antokhina // *Adv. Space Res.* — 2025. — Vol. 75, iss. 7. — P. 5603—5614. — DOI: 10.1016/j.asr.2025.01.054.

Из представленных публикаций четыре входит в список ВАК.

Публикации, которые не входят в перечень ВАК:

1. **Saunkin, A.V.** Comparison of the upper atmosphere temperature obtained by ground-based and satellite instruments / **A.V. Saunkin**, R.V. Vasilyev, M.F. Artamonov // arxiv.org. — 2020.
2. **Саункин, А.В.** Программный комплекс для мониторинга и работы с параметрами верхней атмосферы определяемой спутниковыми методами / **А.В. Саункин**, Р.В. Васильев, А.В. Татарников // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы V Международной научной конференции, Красноярск, 11–14 сентября 2018 года. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. — С. 207–210.
3. **Саункин, А.В.** Сравнение температуры верхней атмосферы, полученной наземными и спутниковыми средствами / **А.В. Саункин**, Р.В. Васильев, М.Ф. Артамонов // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы и XVI Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, 16–21 сентября 2019 года. — Иркутск: ИСЗФ СОРАН, 2019. — С. 280–287.
4. **Саункин, А.В.** Сравнение температуры верхней атмосферы, полученной наземными и спутниковыми средствами / **А.В. Саункин**, Р.В. Васильев, М.Ф. Артамонов // Междунар. Байкальская молодежная науч. школа по фундамент. физике. XVI конф. молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 16–21 сентября 2019 г.: труды. — Иркутск, 2019. — С. 280–284.

5. **Саункин, А.В.** Сравнение интенсивностей свечения атомарного кислорода 557.7 нм, полученных спутниковым методами над Восточной Сибирью / А.В. Саункин, Р.В. Васильев, О.С. Зоркальцева // Международный симпозиум по атмосферной радиации и динамике (МСАРД-2021), 29 июня — 1 июля 2021 г.: тезисы. — Санкт-Петербург, 2021. — С. 130.

6. **Саункин, А.В.** Сравнение интенсивностей свечения атомарного кислорода 557.7 нм, полученных спутниковым методами над Восточной Сибирью / А.В. Саункин, Р.В. Васильев, О.С. Зоркальцева // Космические риски и космическая погода. Иркутск, 14–17 июня 2021 г.: тезисы. — С. 89.

7. **Саункин, А.В.** Интенсивность свечения атомарного кислорода 557.7 нм по спутниковым и наземным наблюдениям над Восточной Сибирью / А.В. Саункин, Р.В. Васильев, О.С. Зоркальцева // XXVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Москва, 5–9 июля 2021 г.: Труды. — С. 194–201.

8. **Саункин, А.В.** Климатология эмиссионного слоя 557.7 нм над югом Восточной Сибири / А.В. Саункин, Р.В. Васильев, О.С. Зоркальцева // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». — Иркутск, 2022. — С. 278–279.

9. **Саункин, А.В.** Климатология эмиссионного слоя 557.7 нм над югом Восточной Сибири / А.В. Саункин, Р.В. Васильев, О.С. Зоркальцева // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН. М., 2022. — С. 224.

10. **Саункин, А.В.** Климатология параметров эмиссионного слоя 557.7 нм над югом Восточной Сибири. Результаты наблюдений и моделирования / А.В. Саункин, Р.В. Васильев, О.С. Зоркальцева, М.Ф. Артамонов, А.В. Михалев // XXIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Москва, 26–30 июня 2023 г.: Труды. — С. E171–E174.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baker D.J., Romick G.J. The rayleigh: Interpretation of the unit in terms of column emission rate or apparent radiance expressed in SI units // Appl. Opt. 1976. Vol. 15. P. 1966–1968.
2. Brasseur G., Solomon S. Aeronomy of the Middle Atmosphere. Cham, Switzerland: Springer, 2005. DOI: 10.1007/1-4020-3824-0.
3. Cogger L.L., Elphinstone R.D., Murphree J.S. Temporal latitudinal 5577 Å airglow variations // Can. J. Phys. 1981. Vol. 59. P. 1296–1307.
4. Emmert J.T., Drob D.P., Picone J.M., et al. NRLMSIS 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities // Earth Space Sci. 2021. Vol. 8. DOI: 10.1029/2020EA001321
5. Fukuyama K. Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere — II. Seasonal and long-term variations // J. Atmos. Terr. Phys. 1977. Vol. 39. P. 1–14.
6. Gao H., Nee J.-B., Xu J. The emission of oxygen green line and density of O atom determined by using ISUAL and SABER measurements // Ann. Geophys. 2012. Vol. 30. P. 695–701. DOI: 10.5194/angeo-30-695-2012.
7. Gao H., Xu J., Ward W., Smith A.K. Temporal evolution of nightglow emission responses to SSW events observed by TIMED/SABER // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. DOI: 10.1029/2011JD015936.
8. Good R. Determination of atomic oxygen density from rocket borne measurement of hydroxyl airglow // Planet. Space Sci. 1976. Vol. 24. P. 389–395. DOI: 10.1016/0032-0633(76)90052-0.
9. Holmes J.M., Conde M., Deehr C., Lummerzheim D. Morphology of evening sector aurorae in λ 557.7-nm Doppler temperatures // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32. DOI: 10.1029/2004gl021553.

10. Kosch M., Ishii M., Nozawa S., et al. A comparison of thermospheric winds and temperatures from Fabry-Perot interferometer and EISCAT radar measurements with models // *Adv. Space Res.* 2000. Vol. 26. P. 979–984. DOI: 10.1016/s0273-1177(00)00041-7.
11. Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Chubarov A.G., et al. Retrieval of Nighttime Distributions of Mesosphere–Lower Thermosphere Characteristics from Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024. Vol. 60. P. 74–86. DOI: 10.1134/S0001433824700051.
12. Kulyamin D.V., Dymnikov V.P. Modeling of the lower ionosphere climate // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. Vol. 51, No. 3. P. 272–291. DOI: 10.1134/s0001433815030068.
13. Medvedeva I.V., Semenov A.I., Perminov V.I., et al. Comparison of ground-based OH temperature data measured at Irkutsk (52°N , 103°E) and Zvenigorod (56°N , 37°E) stations with Aura MLS v3.3 // *Acta Geophysica*. 2013. Vol. 62, No. 2. P. 340–349. DOI: 10.2478/s11600-013-0161-x.
14. Mlynczak M.G., Hunt L.A., Mast J.C., et al. Atomic oxygen in the mesosphere and lower thermosphere derived from SABER: Algorithm theoretical basis and measurement uncertainty // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. Vol. 118. P. 5724–5735. DOI: 10.1002/jgrd.50401.
15. Mlynczak M.G., Hunt L.A., Russell J.M., Marshall B.T. Updated SABER Night Atomic Oxygen and Implications for SABER Ozone and Atomic Hydrogen // *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45. P. 5735–5741. DOI: 10.1029/2018gl077377.
16. Panka P.A., Kutepov A.A., Rezac L. et al. Atomic Oxygen Retrieved from the SABER 2.0- and 1.6- μm Radiances Using New First-Principles Nighttime OH(v) Model // *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45. P. 5798–5803. DOI: 10.1029/2018gl077677.
17. Russell J.M., Mlynczak M.G., Gordley L.L. Overview of the Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry (SABER) experiment for the Thermosphere-Ionsphere-Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission // *Proc. SPIE*. 1994. Vol. 2266. P. 406–415.
18. Semenov A.I., Shefov N.N. Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics. Berlin; Heidelberg : Springer Science & Business Media, 2008. 740 p.
19. Shepherd M.G., Liu G., Shepherd G.G. Mesospheric semiannual oscillation in temperature and nightglow emission // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2006. Vol. 68. P. 379–389.
20. Takahashi H., Clemesha B.R., Batista P.P. Predominant semi-annual oscillation of the upper mesospheric airglow intensities and temperatures in the equatorial region // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. Vol. 57. P. 407–414.
21. Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B. et al. Registering upper atmosphere parameters in East Siberia with Fabry—Perot Interferometer KEO Scientific “Arinae” // *Solnechno-Zemnaya Fizika*. 2017. Vol. 3. P. 70–87. DOI: 10.12737/szf-33201707.
22. Zorkaltseva O.S., Vasilyev R.V., Saunkin A.V., Pogoreltsev A.I. The study of temperature and night green airglow at mid-latitude in MLT during winter // *Proc. SPIE*. 2020. Vol. 11560, 1156081. DOI: 10.1117/12.2574914.
23. Zorkaltseva O.S., Vasilyev R.V. Stratospheric influence on MLT over mid-latitudes in winter by Fabry-Perot interferometer data // *Ann. Geophys.* 2021. Vol. 39. P. 267–276. DOI: 10.5194/angeo-39-267-2021.
24. Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над Байкальской природной территорией в декабре 2020 г. // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 4. С. 102–109. DOI: 10.12737/szf-84202210.