

На правах рукописи

УДК 550.388

Липатов Кирилл Вадимович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА МЕЗОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Российской академии наук
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН

- Научный руководитель:** Доктор физико-математических наук
Семенов Анатолий Иванович
- Официальные оппоненты:** Чл.-корр. РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор Еланский Николай Филиппович
- Кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Платов Юлий Викторович
- Ведущая организация:** Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, кафедра физики
атмосферы физического факультета

Защита диссертации состоится « 25 » апреля 2013 года

в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017 Москва, Пыжевский пер. д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017 Москва, Пыжевский пер. д. 3.

Автореферат разослан « 12 » марта 2013 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.096.01
кандидат географических наук

Л.Д. Краснокутская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Собственное излучение верхней атмосферы Земли активно стало исследоваться с начала 1950-х годов. И сразу же подтвердились предположения, что оно является информативным и чувствительным индикатором состояния средней и верхней атмосферы. Наблюдаемые вариации параметров собственного излучения, обусловленные воздействием солнечной активности, также позволили обнаружить много новых процессов взаимосвязи атмосферных явлений с различными процессами в космическом пространстве. Накопленные за 60 лет наблюдений спектральные характеристики (и их вариации) различных эмиссий верхней атмосферы, позволили выявить ряд новых геофизических явлений в земной атмосфере - распространение волн различного временного масштаба из нижних слоев атмосферы в верхние, многолетнее охлаждение средней и верхней атмосферы, отклик на периодические вариации солнечной активности и т.д. Анализ собственных и опубликованных данных измерений обеспечил обнаружение различных закономерностей вариаций состояния земной атмосферы на различных высотах от 80 км до нескольких десятков тысяч километров. К настоящему времени появились более совершенные средства регистрации эмиссий средней и верхней атмосферы, что позволяет проводить более тонкие исследования в системе солнечно-земных связей для выявления новых ранее не изученных свойств земной атмосферы.

Актуальность работы

Известно, что в средней атмосфере на высотах мезосферы и нижней термосферы (50-100 км), локализовано большое число излучающих слоев различных газовых компонентов: молекулы гидроксила (0.6-4.5 мкм, 87 км), молекулы кислорода (Атмосферная система – полоса (0-1) 854.5 нм, 92 км), (Инфракрасная Атмосферная система – полосы (0-0) 1.27 мкм и (0-1) 1.58 мкм, (40-100 км)), атомы натрия - эмиссия 589.3 нм (93 км), атомы кислорода - эмиссия 557.7 нм (97 км). Благодаря многолетним исследованиям собственного излучения верхней атмосферы получены сведения о закономерностях поведения характеристик, как самих этих эмиссий, так и областей атмосферы, в которых возникают эти излучения.

Однако, изученность свойств Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода (ИКАО₂) оказалась не совсем полной. Во многом, это связано с экспериментальными трудностями оптических измерений в длинноволновой инфракрасной области спектра. В то же время, изучения характеристик этой эмиссии представляется крайне важным, так как процессы ее возникновения на высотах средней атмосферы, непосредственно связаны с одной из наиболее химически активных молекул - озон. Поэтому знания о параметрах этой эмиссии, а также о кинетике фотохимических

процессов ее возникновения, дает непосредственную возможность исследования этого важного химически активного атмосферного компонента в широком диапазоне высот средней атмосферы, то есть там, где традиционные методы исследований этого сделать не могут. Начатые в Канаде измерения ИКАО₂, преимущественно при помощи приборов, установленных на ракетах, шарах-зондах, высотных самолетах, а также частично наземными методами, позволили получить сведения о вариациях ее интенсивности в течение дневного и сумеречного времени суток (из-за недостаточной чувствительности применяемых в то время приемников излучения измерения проводились до зенитного угла Солнца 97°), оценить интенсивность, которая в дневное время достигает 60 мегарэлей, определить высотное распределение интенсивности для указанных условий. На основе полученных данных выполнялись теоретические расчеты для объяснения наблюдаемых вариаций характеристик.

К сожалению, полной систематизации полученных результатов измерений с целью получения аналитических выражений, описывающих статистические закономерности вариаций интенсивности излучения ИКАО₂ для различных гелио-геофизических условий, позволяющих производить оценку параметров излучающего слоя и ожидаемых интенсивностей практически сделано не было. Недостатком теоретических расчетов первоначального периода исследований было использование атмосферных моделей, в которых не учитывалось много факторов, таких как временные вариации состава, температуры, и их зависимости от различных геофизических условий - влияние солнечной активности, многолетних климатических изменений и т.д.

За последние десятилетия для многих атмосферных эмиссий, возникающих на высотах выше 80 км, были разработаны эмпирические модели, описывающие зависимости их различных параметров от разнообразных воздействий на верхнюю атмосферу - солнечная и геомагнитная активности, локальные и глобальные динамические процессы, происходящие под влиянием широкого класса волновых явлений [Шефов и др., 2006]. Отсутствие систематизации результатов эпизодических измерений Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода, охватывающей высотный диапазон 40-100 км, составляло значимый пробел в исследованиях верхней части мезосферы и нижней термосферы.

В последние несколько лет в Лаборатории физики верхней атмосферы Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН на Звенигородской научной станции для регистрации собственного излучения атмосферы стали использоваться современные матричные приемники инфракрасного излучения, обладающие высокой чувствительностью. Это позволило проводить в ночных условиях (зенитные углы Солнца

от 90° до 150°) регулярные наземные спектрографические измерения в ранее недоступной области спектра (1.0-1.7 мкм).

Накопленные на станции Звенигород наземные данные регулярных измерений поведения интенсивности излучения ИКАО₂, а также использование опубликованных результатов предшествующих зарубежных измерений вариаций интенсивности эмиссий 1.27 мкм и 1.58 мкм, были впервые систематизированы и применены для получения сведений о вариациях характеристик мезосферы и нижней термосферы для различных гелио-геофизических условий. Получение этих сведений и обуславливало актуальность таких исследований.

Цель исследований

Задача выполненных исследований состояла в том, чтобы на основе найденных в опубликованных различных работах разрозненных данных о параметрах излучения ИКАО₂, полученных в основном при помощи самолетов, баллонов, ракет, а также наземных приборов, и использования собственных данных регулярных наземных измерений ИКАО₂ при помощи новейших приемников излучения, систематизировать все данные и на их основе получить сведения о вариациях параметров этого излучения, позволяющих исследовать изменения различного временного масштаба характеристик атмосферы на высотах мезосферы и нижней термосферы.

Достижение поставленной цели потребовало решение следующих задач:

1. Разработать и изготовить комплекс спектрографической аппаратуры, обеспечивающей одновременную регистрацию в ИК диапазонах колебательно-вращательных спектров молекул гидроксила и эмиссий ИКАО₂ (1.27 мкм и 1.58 мкм) в сумеречном и ночном собственном свечении верхней атмосферы.

2. Проведение одновременных измерений в нескольких участках спектра, позволяющих охватить необходимые для анализа эмиссии ОН и О₂. Наблюдения должны были выполняться в течение различных сезонов года.

3. Накопление и систематизация экспериментальных данных о характеристиках эмиссий ИКАО₂.

4. Анализ полученных данных с целью выявления вариаций различного временного масштаба характеристик Инфракрасной Атмосферной системы (суточные с временным разрешением 1 минута в сумеречное и ночное время суток, сезонные вариации параметров эмиссий для различных зенитных углов Солнца). Разработка эмпирических моделей вариаций параметров излучения ИКАО₂ в течение суток, сезонов, отображающих влияние географической широты, многолетних изменений, уровня солнечной активности

и геомагнитных возмущений, и взаимосвязь полученных данных с другими характеристиками средней атмосферы.

Научная новизна и основные результаты работы

Проведенные исследования позволили выявить сложный комплекс фотохимических процессов, регулирующих поведения эмиссии ИКАО₂, характеризующей состояние атмосферы в области высот 40-100 км. На этой основе разработаны эмпирические модели вариаций следующих характеристик излучающего слоя ИКАО₂:

1. Эмпирическая модель вариаций интенсивности излучения ИКАО₂ в диапазоне зенитных углов Солнца 0 – 180°, включающая вариации в течение суток, сезонов года, в том числе для конкретных зенитных углов Солнца, поскольку они характеризуют соответствующие свойства атмосферы на заданных высотах средней атмосферы.

2. Эмпирическая модель вариаций температуры атмосферы (на высотах излучающих слоев ИКАО₂) для суточных (сумеречных) и сезонных условий. Для рассматриваемой эмиссии модель создана впервые.

3. Эмпирическая модель вариаций характеристик высотного распределения интенсивности эмиссии ИКАО₂, которая совместно с двумя предыдущими моделями позволяет по результатам наземных измерений интенсивности излучения делать выводы о свойствах и состоянии мезосферы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивалась абсолютной калибровкой измеренных интенсивностей излучения ИКАО₂ с точностью ~ 1%, большим объемом материалов наблюдений и использованием стандартных методов статистической обработки результатов измерений.

Практическая значимость

Результаты проведенных исследований были применены для определения ряда структурных параметров средней атмосферы, а также при разработке эмпирических моделей вариаций интенсивности и высотных распределений температуры и плотности. Они могут быть использованы для уточнения некоторых деталей механизмов возникновения и режима существования молекул озона и связанного с ним гидроксильного излучения, излучающего в том же диапазоне высот.

На защиту выносятся

1. Изготовление комплекса спектрографической аппаратуры, обеспечивающий регистрацию колебательно-вращательных спектров молекул гидроксила и кислорода в ночном собственном свечении верхней атмосферы области спектра 1.0-1.7 мкм. Он

позволяет проводить одновременные измерения нескольких колебательно-вращательных полос молекул ОН и О₂.

2. Эмпирическая модель вариаций интенсивности излучения ИКАО₂ в диапазоне зенитных углов Солнца 0 – 180°, включающая вариации в течение суток, сезонов года, в том числе для конкретных зенитных углов Солнца, поскольку они характеризуют соответствующие свойства атмосферы на заданных высотах средней атмосферы. Впервые выявлен многолетний отрицательный тренд интенсивности – 1.5 % / год (зенитный угол Солнца 100°, высота максимума излучающего слоя 70 км), получены зависимости от географической широты, уровней солнечной и геомагнитной активности.

3. Эмпирическая модель вариаций температуры атмосферы на высотах 40-100 км (по измерениям в ночное время суток для зенитных углов Солнца 90-150°) для различных гелио-геофизических условий, которая была создана впервые для рассматриваемой эмиссии средней атмосферы.

4. Эмпирическая модель вариаций характеристик высотного распределения эмиссии ИКАО₂, связь которой с двумя предыдущими независимыми моделями позволяет по результатам наземных измерений интенсивности излучения делать выводы о свойствах и состоянии мезосферы, в том числе о содержании озона на высотах 40-100 км.

Личный вклад

Работа выполнялась в течение 2009 - 2012 г.г. в ходе проведения плановых работ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук (ИФА им. А.М.Обухова РАН). Автором проведены комплексные спектрографические наблюдения на Звенигородской научной станции ИФА РАН. Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии. Автор принимал прямое участие в обработке, научном анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных.

Апробация результатов

Результаты исследований докладывались на симпозиумах и конференциях:

34-й Апатитский семинар «Авроральные явления» (Апатиты, 2-4 марта 2011 г.), Полярный Геофизический Институт Кольского филиала РАН; Международном Симпозиуме Атмосферная Радиация и Динамика (С.Петербург, 21-24 июня 2011 г.); 39-я Конференция «Ежегодные Европейские Симпозиумы по Оптическим Исследованиям Атмосферы» (Польша, Сопот, 20-24 августа 2012 г.); семинары в Институте физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН и на Кафедре физики атмосферы МГУ им. М.В. Ломоносова.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, из них 6 в журналах, входящих в список ВАК.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

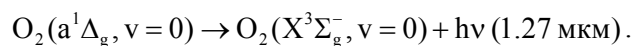
Введение

Изложено современное состояние оптических исследований собственного излучения верхней атмосферы Земли, позволяющего получать необходимые сведения о структурных параметрах атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы. Обоснована актуальность исследований излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода, дающей возможность изучения важного диапазона высот средней атмосферы 40-100 км, связанного с процессами образования озона, который, в свою очередь, через сложную совокупность фотохимических процессов, активно влияет на высотное распределение температуры мезосферы. Показано, что измерения интенсивности рассматриваемого излучения в инфракрасной области спектра 1.2 – 1.7 мкм при помощи наземных спектрометрических средств, использующих современные высокочувствительные приемники излучения, позволяют выявить закономерности поведения структурных параметров атмосферы на высотах свечения ИКАО₂.

Глава 1. Современное состояние исследований

Впервые Инфракрасная Атмосферная система молекулярного кислорода (полоса (0-0) в области спектра 1.3-1.6 мкм) ИКАО₂ наблюдалась в Советском Союзе в 1956 г. в дневном излучении при помощи приборов, поднятых на аэростатах. Справедливости ради необходимо отметить, что авторами этих измерений первоначально она не была отождествлена [Гопштейн и Кушпиль, 1964; Gopshtein and Kushpil, 1965].

Это излучение обуславливается электронным переходом из метастабильного состояния



Поскольку эта полоса испытывает сильное поглощение в нижних слоях атмосферы, то первые наземные наблюдения ИКАО₂ были проведены в сумеречных условиях в начале 1957 г. в Канаде по эмиссии полосы (0-1) 1.58 мкм [Vallance Jones and Harrison, 1958; Noxon and Vallance Jones, 1962]. Дальнейшие исследования и проводились преимущественно в Канаде [Vallance Jones and Gattinger, 1963; Evans et al., 1970; Gattinger and Vallance Jones, 1966, 1973]. Эпизодические исследования проводились также в США, Бразилии и Японии. Вследствие трудностей наблюдений в этой области спектра

измерения интенсивности свечения полосы (0-0) 1.27 мкм осуществлялись эпизодически при помощи приборов, поднимаемых на баллонах и самолетах. Регистрация полосы (0-1) 1.58 мкм осуществлялась преимущественно в наземных условиях. В дневных условиях эмиссия 1.27 мкм достигает интенсивности почти 60 мегарэлей при зенитном угле Солнца $\chi_{\square} = 0^{\circ}$ [Wraight and Gadsden, 1975], эмиссия 1.58 мкм – 720 килорэлей. Вследствие недостаточной чувствительности приемников излучения в те годы наблюдения удавалось проводить в сумеречных условиях до зенитных углов Солнца не более чем до 107° .

При измерениях ИКАО₂ реально наблюдаются только полосы (0–0) 1.27 мкм и (0–1) 1.58 мкм. Вследствие сильного поглощения резонансной эмиссии в полосе (0–0) 1.27 мкм ее интенсивность сильно ослабляется (до 4 % от начального значения) при распространении к поверхности Земли. Регистрируется только часть полосы за счет переходов между высокими вращательными уровнями, сильно искаженная в своем спектральном распределении. В ночных условиях интенсивность составляет около 100 килорэлей, в дневное время она достигает 60 мегарэлей.

В многочисленных работах, в которых приводятся непосредственно измеренные данные о вариациях интенсивности эмиссий 1.27 мкм и 1.58 мкм, основное внимание уделялось сопоставлению этих данных с результатами теоретических расчетов. Это делалось для выявления наиболее предпочтительных фотохимических механизмов образования эмиссий и определения их характеристик. При этом анализировались практически только вариации в течение вечерних сумеречных периодов, в течение которых наблюдается гораздо более медленное уменьшение интенсивности с изменением зенитного угла Солнца по сравнению с поведением в утренние сумерки, во время которых для тех же зенитных углов Солнца рост интенсивности происходит существенно быстрее. Такой эффект, естественно, обусловлен фотохимическим процессом фотолиза атмосферного озона в освещенных Солнцем высотах земной атмосферы.

В вечерние сумерки при изменении зенитного угла Солнца χ_{\square} от 70° до 100° интенсивность уменьшается от 20 мегарэлей до 250 килорэлей. Анализ опубликованного материала измерений эмиссий (0-0) 1.27 мкм и (0-1) 1.58 мкм в течение более 30 лет обнаружил, что проведение измерений при помощи самолетных, баллонных, ракетных и спутниковых средств носило эпизодический характер. Результаты редких (практически дневных) измерений широтного распределения интенсивности свечения ИКАО₂, свидетельствовали о ее слабой зависимости от широты. Имеющиеся в печати примеры влияния солнечной и геомагнитной активности на характеристики ИКАО₂ содержат слишком мало данных измерений, чтобы получить на их основе значимые эмпирические закономерности.

В связи с этим в настоящей работе было предпринято создание службы регулярных измерений интенсивности свечения ИКАО₂. Данные таких измерений позволили бы выявить закономерности временных изменений интенсивности излучения для различных гелио-геофизических условий. Такая служба спектрофотометрических измерений была создана на Звенигородской станции Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН. Данные, представленные в данной работе, охватывают период наблюдений - 2009 – 2011 г.г.

Глава 2. Аппаратурно – методические способы измерений характеристик Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода

Спектральная структура полос. Аппаратурно-методическая особенность настоящих исследований определялась необходимостью применения светосильных спектрографов и высокочувствительных приемников излучения в инфракрасной области спектра 1.2 – 1.7 мкм для регистрации излучения верхней атмосферы Земли в сумеречное и ночное время суток. Это излучение обусловлено Инфракрасной Атмосферной системой молекулярного кислорода. Особенность спектрального состава вращательно-колебательных полос этой системы молекулы кислорода состоит в том, что они имеют 9 ветвей, обусловленных переходами между электронными состояниями $a^1\Delta_g$ и $X^3\Sigma_g^-$: sR , rR , qR , rQ , qQ , pQ , oP , pP , oP с взаимно перекрывающимися линиями. Несмотря на многолетние исследования этого излучения (преимущественно в Канаде), в имеющихся публикациях отсутствуют данные о длинах волн линий рассматриваемых полос (0-0) 1.27 мкм и (0-1) 1.58 мкм (имеются только волновые числа). Не приводятся в публикациях также и профили распределения интенсивности для этих полос для различных значений вращательной температуры.

Поэтому для обеспечения анализа данных наземных измерений характеристик этих эмиссий, были проведены теоретические расчеты всех длин волн, распределений интенсивностей, соответствующих значениям температуры 180 К, 200 К, 220 К, 250 К, 280 К, которые охватывают диапазон значений для области высот 40-100 км, и получены сглаженные спектральные распределения с разрешающей способностью 1 нм, которая соответствует аппаратурному разрешению используемых приборов в Звенигороде.

Геометрические условия измерений. Важной особенностью проводимых измерений является необходимость тщательного учета геометрических условий регистрации излучения, которые определяют конкретные моменты времени, значения зенитного угла Солнца во время сумеречных периодов суток. Необходимо подчеркнуть, что по условиям

регистрации в Звенигороде, оптические оси спектрографов были ориентированы на северную область неба в направлении с зенитным углом визирования $\zeta_0 = 60^\circ$ и азимуте $A_0 \approx 160^\circ$, отсчитываемого от точки юга. Для быстро меняющейся интенсивности в течение сумерек поправка во времени для учета быстрых вариаций высоты излучающего слоя может быть существенной. При различных значениях координат линии визирования это обуславливает необходимость расчета зенитных углов Солнца для конкретных значений широты места регистрации излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода.

Измерения интенсивности излучения. Основной трудностью регистрации эмиссий O_2 (0-0) 1.27 мкм и (0-1) 1.58 мкм являлась ограниченная чувствительность имеющихся приемников излучения в этой области спектра. Первые зарубежные измерения использовали фотометры с применением светофильтров. Однако уже тогда было известно, что вблизи полосы (0-1) 1.58 мкм молекулярного кислорода расположены интенсивные полосы молекул гидроксила (3-1) и (4-2). При измерениях со светофильтрами для зенитных углов Солнца $\chi_0 \geq 100^\circ$ блендирующее влияние гидроксильных полос может вносить существенные искажения в получаемые результаты измерений. Спектрографические измерения в Звенигороде с применением современных ПЗС приемников позволили осуществлять наземные регистрации полосы 1.58 мкм в сумеречное и ночное время суток для зенитных углов Солнца $90^\circ - 150^\circ$, которые обусловлены географическим положением станции наблюдений.

Спектральная аппаратура и приемники излучения. Главная трудность при регистрации спектров собственного излучения верхней атмосферы состоит в малой интенсивности отдельных спектральных линий молекулярных полос, составляющей $1 \div 100$ рэлей, т.е. исчисляемая $10^6 \div 10^8$ фотонов на квадратный сантиметр в секунду. Поэтому с самого начала исследований возникла необходимость в применении светосильных спектрографов с использованием высокочувствительных приемников излучения.

В конце 1940-х гг. в Государственном оптическом институте им. С.И.Вавилова были специально разработаны уникальные дифракционные светосильные спектрографы СП-50, которые используются для регулярных измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН. С 2009 г. для регистрации спектров были применены современные линейные приемники (использующие ПЗС) с высокой чувствительностью. Для измерения эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы O_2 (0-0) 1.27 мкм и (0-1) 1.58 мкм спектрографы СП-50 были оснащены

инфракрасными ПЗС линейными приемниками Andor DU492A-1.7 (InGaAs) (ORIEL Instruments, Германия). Размер пикселя 26x26 мкм. Для получения наилучшего соотношения сигнал/шум ПЗС-линейка охлаждалась до -60°C с помощью термоэлектрического холодильника. Компьютерная обработка полностью автоматизировала сеанс наблюдения. В частности, позволяла задать время начала и окончания наблюдения, обеспечивала необходимый режим охлаждения приемника и учет собственного шумового фона, а также управляла работой оператора (указывала время открытия и закрытия затвора спектрографа).

Калибровка аппаратуры проводилась при помощи специальных измерений с помощью телескопа ЦЕЙС 600, находящегося в Астрономическом институте им. П.К. Штернберга. Для этого был зарегистрирован спектр излучения звезды α Aug класса G8III (звездная величина 0.03^m) таким образом, чтобы изображение звезды в фокальной плоскости полностью помещалось в щели спектрографа. После этого был зарегистрирован эталонный источник, представляющий собой лампу накаливания. Свет от лампы накаливания попадал на рассеивающий экран и далее на щель спектрографа. Калибровка обеспечивала получение абсолютных значений измеряемой интенсивности с точностью 1%.

Вся выделенная прибором область спектра регистрировалась одновременно, что исключало влияния изменения интенсивности различных участков спектра за время экспозиции (как в случае использования сканируемых фотометров). Экспозиция для условий зенитных углов Солнца $\chi_{\square} \square 90-150^{\circ}$ составляла 1 мин. Поскольку полоса 1.27 мкм значительно искажена поглощением в нижних слоях атмосферы, то практически регулярные измерения проводились только для полосы 1.58 мкм.

Измерения вращательной температуры эмиссии. В проводившихся ранее экспериментах исследовалось только поведение интенсивности для различных условий освещения Солнцем верхней атмосферы. Это было обусловлено малой спектральной разрешающей способностью применяемых приборов и недостаточной чувствительностью используемых приемников излучения.

Известно, что у всякой колебательно-вращательной полосы двухатомных молекул распределение интенсивности вращательных линий определяется температурой среды, в которой возникает излучение. Поэтому при наличии качественных спектров можно пытаться определить вращательную температуру (T_r) полос Инфракрасной Атмосферной системы, которая может быть определена по отношению интенсивностей участков измеряемого распределения интенсивности полосы 1.58 нм. Полученные в Звенигороде

качественные спектрофотограммы полосы 1.58 мкм впервые позволили определять вращательную температуру, которая отображает температуру внутри излучающего слоя этой эмиссии. Для определения вращательной температуры молекулярных полос Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода при условии неразрешенной спектральной структуры вращательных ветвей приходится использовать корреляционное сопоставление измеренных спектральных распределений интенсивностей и их расчетных профилей для различных значений температуры.

С учетом поправки на поглощение измеренных интенсивностей полосы (0-1) формула для определения температуры имеет вид

$$T_r = 92.6 \frac{I(1.580)}{I(1.577)} - 161.5, \text{ К},$$

где $I(1.580)$ и $I(1.577)$ – интенсивности участков полосы (0-1), измеренные на спектрограммах. Погрешность определения температуры составляла ~ 3 К.

Измерения высоты излучающего слоя. Важным параметром атмосферной эмиссии молекулярного кислорода является высота излучающего слоя, поскольку ее положение в верхней атмосфере определяет все закономерности происходящих фотохимических процессов возбуждения излучения и ее дезактивации. Реальные сведения о высотном распределении свечения были получены на основе ракетных и спутниковых измерений. Общее их количество, выполненное на средних широтах в Канаде, США, Бразилии и Японии составило 32. Анализ полученных высотных распределений интенсивности свечения ИКАО₂ выявил наличие существенной высотной асимметрии Р интенсивности эмиссии относительно своего максимального значения. Рассмотрение высотных распределений для участков ниже и выше максимума $Q_{\max}(Z_{\max})$ показало весьма удовлетворительное согласие с нормальным распределением, естественно, с различными значениями полуширин, для верхней и нижней частей высотного распределения. Здесь важно подчеркнуть, что для каждой части высотного профиля доли суммарной полуширины равны PW и $(1-P)W$, соответственно. Тем не менее, для аппроксимации нормального распределения каждого участка их полуширины равны $2PW$ и $2(1-P)W$, соответственно.

Все эти параметры имеют зависимость от зенитного угла Солнца, в том числе и асимметрия Р, определяющая долю верхней части полуширины W всего асимметричного высотного профиля. Таким образом, для верхней части нижнего слоя

$$Q(Z) = Q_{ML} \exp \left[-\frac{\ln 2(Z - Z_{ML})^2}{P^2 W^2} \right]$$

и его нижней части

$$Q(Z) = Q_{ML} \exp \left[-\frac{\ln 2(Z - Z_{ML})^2}{(1-P)^2 W^2} \right].$$

Регистрируемая интенсивность определяется соотношениями: для верхней части

$$I_{\text{upp}}[Z(\chi)] = \int_0^{\infty} Q_{\text{upp}}(Z, \chi) dZ = Q_{\text{max}}[Z_{\text{max}}(\chi)] \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} P(\chi) \cdot W(\chi),$$

для нижней части

$$I_{\text{bot}}[Z(\chi)] = \int_0^{\infty} Q_{\text{bot}}(Z, \chi) dZ = Q_{\text{max}}[Z_{\text{max}}(\chi)] \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} [1 - P(\chi)] \cdot W(\chi).$$

Отсюда интенсивность всего высотного профиля эмиссии

$$I[Z(\chi)] = I_{\text{upp}}[Z(\chi)] + I_{\text{bot}}[Z(\chi)] = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} \cdot Q_{\text{max}}[Z_{\text{max}}(\chi)] \cdot W(\chi).$$

Характеристики фотохимических процессов, участвующих в образовании метастабильных молекул кислорода. По своему содержанию теоретические и лабораторные исследования процессов, в той или иной степени связанных с Инфракрасным Атмосферным излучением молекул кислорода, были посвящены проблемам вероятности переходов с излучением, возбуждению различными способами, дезактивации, сопутствующим механизмам поглощения ультрафиолетового излучения, обуславливающего образования химически активных компонентов.

Исследования высотного распределения эмиссии 1.27 мкм и связи механизмов ее возникновения на высотах средней атмосферы в области мезосферы дали возможность использовать эти данные для получения характеристик слоя озона. Однако, имеющиеся примеры таких разработанных моделей показали свое несовершенство вследствие того, что при их построении использовались модели состава средней атмосферы, разработанные в предшествующие годы, не учитывающие влияние солнечной активности и многолетних изменений температуры атмосферы.

Полученные закономерности поведения различных параметров эмиссии ИКАО₂ создали основу для разработки в дальнейшем модели, описывающей закономерности вариаций озона мезосферы.

Глава 3. Эмпирическая модель вариаций интенсивности излучения

Суточные вариации. Первым и необходимым этапом анализа поведения собственного излучения верхней атмосферы является рассмотрение вариаций его интенсивности в течение времени суток. Особенностью анализа вариаций эмиссии ИКАО₂ является то, что в отличие от других эмиссий, изучаемых при помощи наземных спектрофотометрических средств только в периоды сумерек и ночи, т.е. в пределах зенитного угла Солнца $97^\circ \geq \chi_\square \geq \text{полночь} \geq \chi_\square \geq 97^\circ$, эмиссия ИКАО₂ активно исследовалась еще и при помощи ракетных и баллонных методов. Это было вызвано во многом особенностями пропускания атмосферой двух, имеющихся у ИКАО₂ колебательно-вращательных полосы (0-0) 1.27 мкм и (0-1) 1.58 мкм, соотношение интенсивностей которых равно 80.

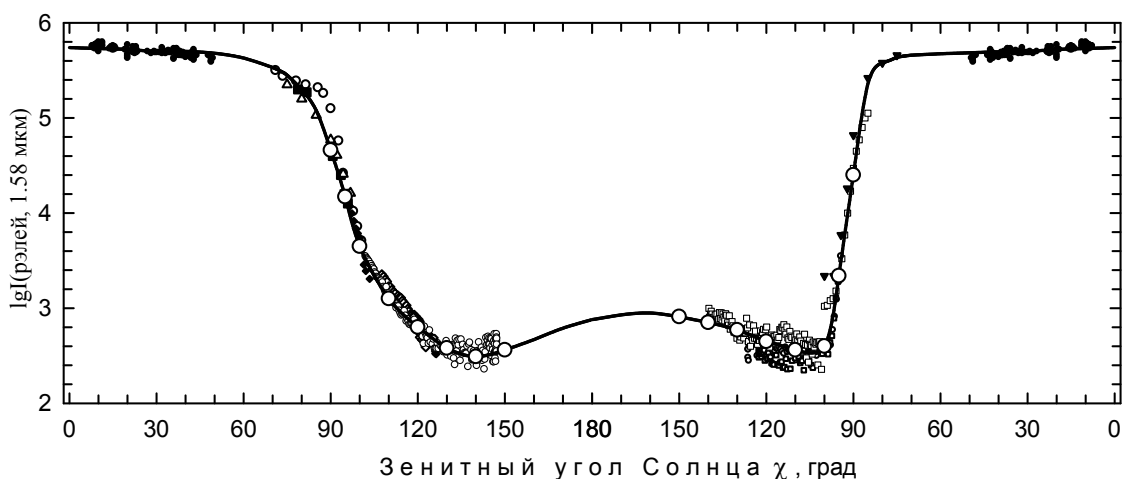


Рис. 1. Суточные вариации логарифма интенсивности эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм по данным различных измерений. Интервалы: $0^\circ \leq \chi_\square \leq 50^\circ$ (после полудня) и $50^\circ \geq \chi_\square \geq 0^\circ$ (до полудня), широты $20 \div 45^\circ \text{N}$, май-июль 1973 г., $F_{10.7} = 90$ [Wraight and Gadsden, 1975]; интервалы $70^\circ \leq \chi_\square \leq 100^\circ$ (вечер) и $100^\circ \geq \chi_\square \geq 75^\circ$ (утро), Саскатун, октябрь 1965, $F_{10.7} = 80$ — эмиссия 1.27 мкм [Hunten, 1967; Pick et al., 1971; Noxon, 1982]. Интервалы $90^\circ \leq \chi_\square \leq 150^\circ$ (до полуночи) и $150^\circ \geq \chi_\square \geq 90^\circ$ (после полуночи) — эмиссия 1.58 мкм, Звенигород, декабрь 2009 — ноябрь 2010 г., $F_{10.7} = 80 \pm 3$. Интервалы $150^\circ \leq \chi_\square \leq 180^\circ$ (до полуночи) и $180^\circ \geq \chi_\square \geq 150^\circ$ (после полуночи) — на основе вариаций эмиссии 557.7 нм [Семенов и Шефов, 1997; Шефов и др., 2006], среднегодовые значения для соответствующих зенитных углов Солнца — большие кружки. Сплошная линия — аппроксимация [Липатов и Перминов, 2012].

Выше уже говорилось, что эмиссию 1.27 мкм реально возможно исследовать только при помощи поднимаемых в верхние слои атмосферы приборов вследствие значительного поглощения ее в тропосфере. Для наземных измерений пригодна только

полоса (0-1) 1.58 мкм, интенсивность которой при $92^\circ \leq \chi_{\square} \leq 98^\circ$ оставляла 8÷5 килорэлей. Существенное изменение в возможности регистрации ИКАО₂ произошло благодаря появлению новых ПЗС приемников излучения в области спектра 1-2 мкм и применения их на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН ($\varphi = 55.7^\circ \text{N}, \lambda = 36.8^\circ \text{E}$). Они позволили регистрировать эмиссии 1.27 мкм и 1.58 мкм в пределах зенитных углов Солнца $85^\circ \leq \chi_{\square} \leq 160^\circ$. Использование всего имеющегося материала наблюдений за период с 1957 до 2010 гг., включающегося собственные и опубликованные данные, дало возможность выявить закономерность вариации эмиссии 1.58 мкм в течение всего интервала суток, т.е. от зенитного угла Солнца $0^\circ \leq \chi_{\square} \leq 180^\circ \geq \chi_{\square} \geq 0^\circ$ (рис.1). Такая ситуация для земных условий реализуется в широтном диапазоне $23^\circ \text{S} \leq \varphi \leq 23^\circ \text{N}$, т.е. фактически в плоскости эклиптики. Важно подчеркнуть, что полученная суточная зависимость представлена впервые.

Сплошная линия (Рис. 1) – аппроксимация. Ее аналитическое выражение имеет вид для послеполуденного периода

$$\lg I(\text{рэлей}, \chi_{\square}) = 2.56 + \frac{3.18}{1 + \exp\left[\frac{(\chi_{\square} - 95.7)}{8.50}\right]} - 0.14 \cdot \cos\frac{2\pi}{360}(\chi_{\square} - 29.3) + \\ + 0.154 \cdot \cos\frac{2\pi}{180}(\chi_{\square} - 16.8) - 0.08 \cdot \cos\frac{2\pi}{120}(\chi_{\square} - 17.8) + 0.03 \cdot \cos\frac{2\pi}{90}(\chi_{\square} - 13.9).$$

и для дополуночного интервала суток

$$\lg I(\text{рэлей}, \chi_{\square}) = 2.56 + \frac{3.18}{1 + \exp\left[\frac{(\chi_{\square} - 91.3)}{3.16}\right]} - 0.14 \cdot \cos\frac{2\pi}{360}(\chi_{\square} + 29.3) + \\ + 0.154 \cdot \cos\frac{2\pi}{180}(\chi_{\square} + 16.8) - 0.08 \cdot \cos\frac{2\pi}{120}(\chi_{\square} + 17.8) + 0.03 \cdot \cos\frac{2\pi}{90}(\chi_{\square} + 13.9).$$

Суточные вариации были получены для всех месяцев года на основе результатов измерений в Звенигороде в течение 2009 – 2011 гг. Пример для октября месяца показан на рис.2.

Анализ полученной аппроксимации суточных вариаций логарифма интенсивности для различных месяцев года позволил выявить систематические закономерности вариаций входящих параметров. Это дало возможность построить единые зависимости поведения интенсивности излучения 1.58 мкм для периодов суток – до полуночи и после полуночи.

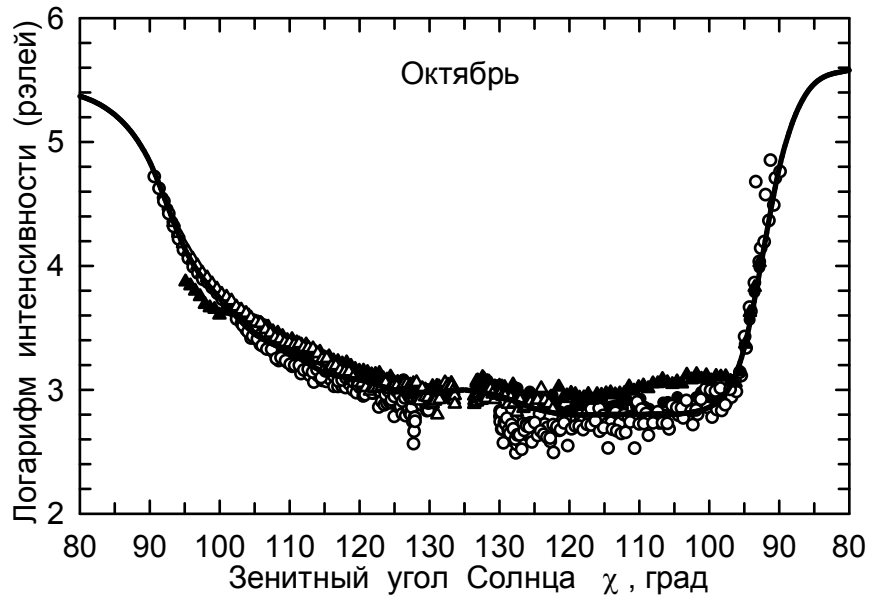


Рис.2. Среднемесячные вариации логарифма интенсивности эмиссии (0-1) 1.58 мкм в ночное время (октябрь 2010 г., F10.7 = 82, $t_d = 288$). Различные значки соответствуют различным ночам наблюдений. Сплошная линия – аппроксимация [Липатов и Перминов, 2012].

Для вечернего интервала ночи

$$\begin{aligned} \lg I^{\text{ev}}(\text{рэлей}, \chi_{\square}) = & 2.7 + 0.12 \cdot \cos \frac{360}{365} t_d + \frac{3.25}{1 + \exp \left[\frac{\chi_{\square} - 95}{9.5 + 0.5 \cdot \cos \frac{360}{365} t_d} \right]} + \\ & + 0.01 \left[6 + 2.7 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + 3.3 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 185) \right] \cdot \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi_{\square}(t_d)} (\chi_{\square} - 6) + \\ & + 0.01 \left[4 + 2.0 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + 2.7 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 180) \right] \cdot \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi_{\square}(t_d)} (\chi_{\square} - 4) \end{aligned}$$

Для утреннего интервала ночи

$$\begin{aligned} \lg I^{\text{dw}}(\text{рэлей}, \chi_{\square}) = & 2.7 + 0.12 \cdot \cos \frac{360}{365} t_d + \frac{3.25}{1 + \exp \left[\frac{\chi_{\square} - 91}{3.25 + 0.25 \cdot \cos \frac{360}{365} t_d} \right]} + \\ & + 0.01 \left[6 + 2.7 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + 3.3 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 185) \right] \cdot \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi_{\square}(t_d)} (\chi_{\square} + 6) + \\ & + 0.01 \left[4 + 2.0 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 350) + 2.7 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 180) \right] \cdot \cos \frac{2\pi}{\Delta\chi_{\square}(t_d)} (\chi_{\square} + 4) \end{aligned}$$

Здесь

$$\Delta\chi_{\square}(t_d) = 2[\chi_{\square}^{\text{mm}}(t_d) - 90^{\circ}] = 2[90^{\circ} - (\varphi + \delta_{\square})].$$

Как видно, для условий сумеречных наблюдений при зенитных углах Солнца $\chi_{\square} > 90^{\circ}$ значение интервала $\Delta\chi_{\square}$ может быть больше нуля в течение года на широтах $\varphi < 66^{\circ}$. На широте Звенигорода (55.7°N) зависимость этого интервала от дня года может быть оценена по формуле

$$\Delta\chi_{\square}(t_d) \approx 68^{\circ} + 47^{\circ} \cdot \cos \frac{360}{365}(t_d - 342).$$

Сезонные вариации. Сезонные вариации являются весьма значимыми для эмиссии (0-1) 1.58 мкм, причем они существенны для конкретных зенитных углов Солнца. Результаты измерений в Звенигороде сезонных вариаций интенсивности (на графиках представлены значения логарифмов интенсивности) для различных зенитных углов Солнца в течение вечерних и утренних сумерек показали, что амплитуды вариаций в вечернее время существенно больше, чем в утреннее время. На основе этих сведений были получены среднегодовые значения интенсивности для различных зенитных углов Солнца.

Зависимость от географической широты.

Возникновение эмиссии ИКАО₂ в дневное время обусловлено фотолизом молекул озона на высотах 50-80 км, а в ночное время процессами образования электронно-возбужденных молекул кислорода в реакциях тройных столкновений атомов кислорода (механизм Барта), вследствие которых возбуждаются высокие метастабильные состояния O₂, а также ИКАО₂ и эмиссия атомарного кислорода 557.7 нм. Поэтому широтные вариации эмиссии 1.58 мкм существенно зависят от времени суток. Однако таких широтных измерений специально не проводилось. Имеющиеся данные для дневных условий свидетельствуют о незначительной зависимости интенсивности 1.58 мкм от широты. Для анализа широтного поведения интенсивности 1.58 мкм в дневных условиях использовались результаты измерений эмиссии в различных широтных и долготных диапазонах. Для дневных условий аппроксимация широтной зависимости интенсивности 1.58 мкм имеет вид:

$$\lg I(\varphi, 1.58 \text{ мкм, рэлей}) = 5.40 + 0.31 \cdot \cos^{0.5} \varphi.$$

Для оценки характера широтных вариаций в ночное время использованы данные для эмиссии 557.7 нм, представленные в работах [Фишкова и др., 2000; Шефов и др., 2006]. На этой основе для ночных условий широтная зависимость интенсивности 1.58 мкм может быть представлена следующим выражением:

$$\lg I(\varphi, 1.58 \text{ мкм, рэлей}) = \lg \{240 + 880 \cdot [\cos 1.8(\varphi - 40)]^{4.5}\}.$$

Многолетние вариации. Анализ результатов измерений интенсивности эмиссии ИКАО₂ 1.58 мкм как в течение суток, так и в течение различных сезонов, позволил сделать оценку многолетних изменений интенсивности за период около 50 лет (1957 - 2010 гг.). Сопоставление данных первых измерений, проводившихся в Канаде в Саскатуне в западном полушарии на широте $\varphi = 52.1^\circ \text{N}$, и в Звенигороде ($\varphi = 55.7^\circ \text{N}$) показало, что имеется заметное уменьшение интенсивности, которое соответствует линейному тренду -1.5 \%/год [Семенов и др., 2011].

Зависимость от уровня солнечной активности. Просмотр и анализ всех результатов конкретных измерений для отдельных дат, выполненных в течение периода 1957-1975 гг., дал возможность получить корреляцию логарифма интенсивности с индексом солнечной активности F10.7 (коэффициент корреляции $r = 0.780 \pm 0.113$)

$$\lg I(\text{рэлей, 1.58 мкм}) = 3.71 + \frac{F10.7 - 130}{290}.$$

Зависимость от уровня геомагнитного возмущения. Усиление интенсивности ИКАО₂ было выявлено в периоды авроральной активности. Наблюдаемое усиление по всей вероятности связано с процессом возбуждения молекулярного кислорода электронами. Для получения более достоверной зависимости интенсивности излучения от уровня геомагнитного возмущения были использованы данные конкретных измерений, для которых были указаны даты. На основе этих данных были получены значения интенсивности эмиссии 1.58 мкм для зенитного угла Солнца $\chi_{\square} = 100^\circ$ и разных уровней геомагнитной активности, характеризуемой K_p индексами. Линейная аппроксимация зависимости логарифма измеренных интенсивностей для разных уровней геомагнитной активности (коэффициент корреляции $r = 0.787 \pm 0.087$) имеет вид:

$$\lg I(\text{рэлей, 1.58 мкм}) = (3.47 \pm 0.05) + (0.056 \pm 0.010) \cdot K_p.$$

Таким образом, в первом приближении удастся установить количественную зависимость интенсивности эмиссий ИКАО₂ от уровня геомагнитного возмущения.

Глава 4. Эмпирическая модель вариаций высотного распределения объемной интенсивности эмиссии

Собранные и систематизированные опубликованные данные ракетных и спутниковых измерений были использованы для построения зависимостей параметров нижнего (на высотах стратосферы) и верхнего (на высотах мезопаузы) излучающих слоев: высоты максимума Z_M объемной интенсивности излучающего слоя эмиссии ИКАО₂, его полуширины W и асимметрии P от зенитного угла Солнца χ .

На основе представленных данных измерений были получены эмпирические аппроксимации зависимостей параметров высотных распределений от зенитного угла Солнца (рис.3). Для дополуночного (утреннего) интервала суток:

верхний слой

$$Z_{MUev}(\chi, \text{км}) = 86.0 + \frac{4.0}{1 + \exp\left(-\frac{\chi - 124.0}{7.6}\right)},$$

нижний слой

$$Z_{MLmo}(\chi, \text{км}) = 45.0 + \frac{45.8}{1 + \exp\left(-\frac{\chi - 93.5}{3.4}\right)},$$

верхний слой

$$Z_{MUmo}(\chi, \text{км}) = 86.0 + \frac{4.8}{1 + \exp\left(-\frac{\chi - 87.2}{5.2}\right)},$$

Аналогичные соотношения были получены для других параметров излучающего слоя: полуширины W , асимметрии P , логарифма объемной интенсивности максимума излучающего слоя $\lg Q_M(\chi, \text{фотон см}^{-3}\text{с}^{-1})$.

Важный интерес представляют зависимости параметров нижнего слоя излучения, как наиболее интенсивного компонента наблюдаемой эмиссии 1.27 мкм, а также 1.58 мкм, от высоты максимума объемной интенсивности излучающего слоя. На основе эмпирических соотношений были получены такие зависимости.

Таким образом, впервые были проведены систематизация и статистический анализ данных ракетных и спутниковых измерений высотного распределения объемной интенсивности излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода 1.27 мкм. Измерения проводились в течение периода более 30 лет в различных географических пунктах и в различные сезоны года. Это позволило выявить средние закономерности их вариаций в течение суток. Полученная эмпирическая модель

позволяет делать оценки параметров излучающего слоя для заданных значений зенитного угла Солнца

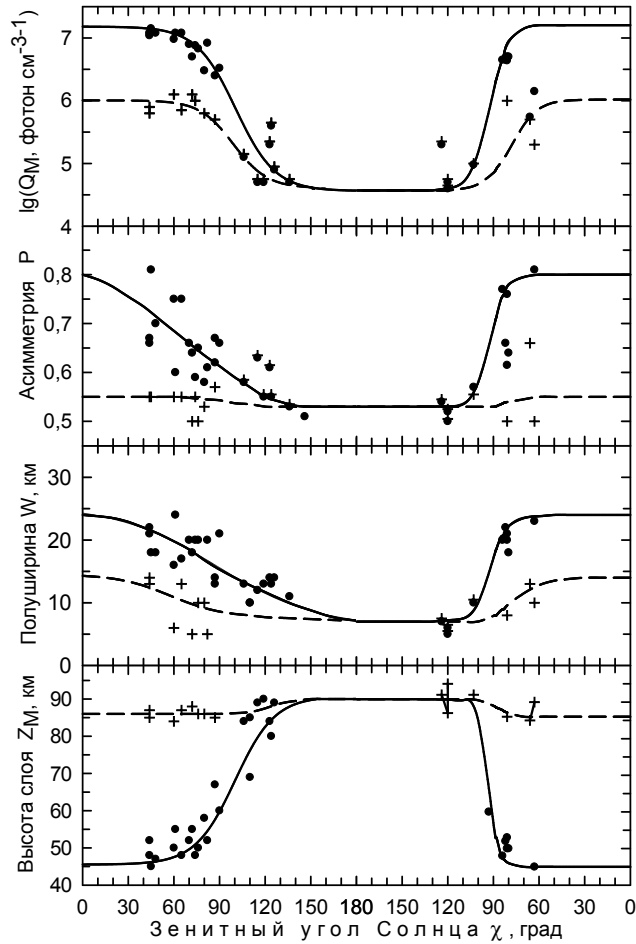


Рис. 3. Зависимости от зенитного угла Солнца: высот максимумов излучающего слоя эмиссии 1.27 мкм, его полуширин, и асимметрии, а также логарифмов измеренной объемной интенсивности эмиссии 1.27 мкм на высотах максимумов нижней и верхней частей излучающего слоя по результатам ракетных и спутниковых измерений. Точки – нижний слой, крестики – верхний слой, сплошные и прерывистые линии – аппроксимация [Липатов, 2013]

Глава 5. Эмпирическая модель вариаций температуры

Наблюдения, выполненные на станции Звенигород в течение 2009 - 2011 гг., позволили создать базу данных об интенсивности и вращательной температуре излучения ИКАО₂, охватывающей большое количество ночей различных месяцев года. Результаты анализа подтвердили, что суточные вариации температуры имеют большое сходство с

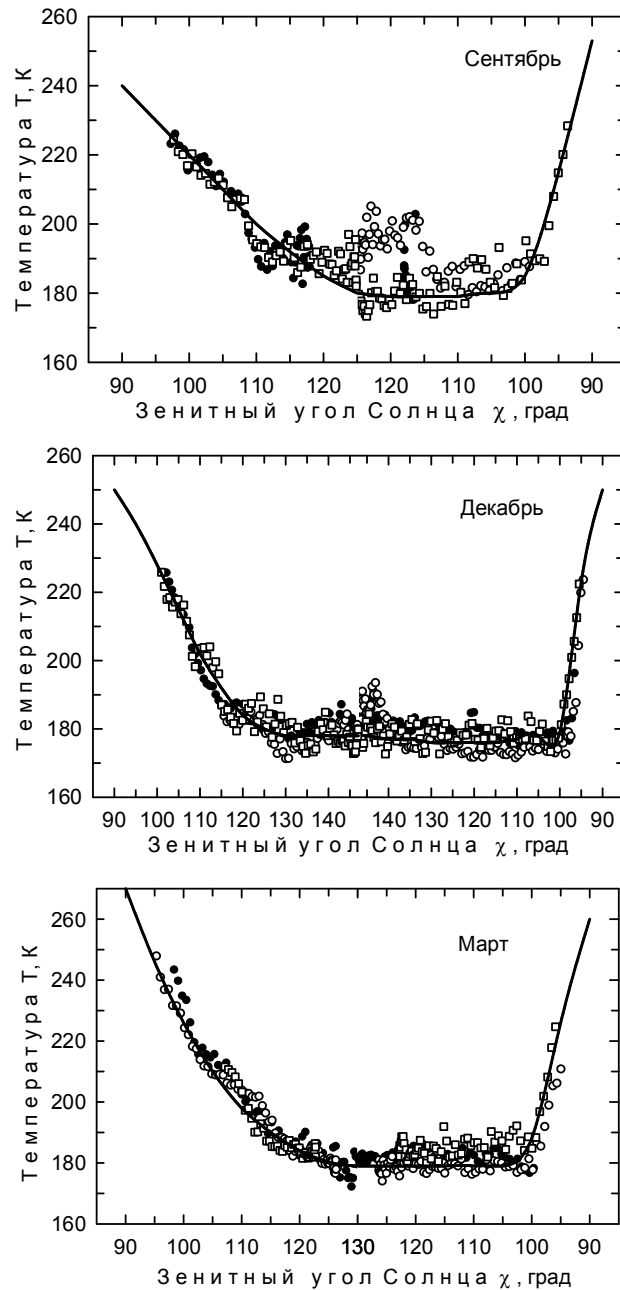


Рис. 4. Вариации температуры полосы (0-1) 1.58 мкм ИКАО₂ в течение ночного периода суток для трех сезонов года: сентябрь, декабрь, март 2010 г. Значки – данные измерений для различных дат, сплошные линии – вариации температуры мезосферы для указанных месяцев по данным спутника AURA [Перминов и Липатов, 2013] наблюдений (ст. Звенигород) спутником AURA. Они показаны сплошными линиями на рисунке.

вариациями логарифма измеренных интенсивностей. Данные измерений вариаций температуры для трех месяцев года показаны на рисунке. Ранее полученные результаты о зависимости высоты максимума излучающего слоя от зенитного угла Солнца [Липатов, 2013] позволили сопоставить измеренные значения температуры с данными высотных

профилей температуры средней атмосферы, полученными в районе наблюдений с помощью спутника AURA.

Сезонные вариации температуры для ночных интервалов могут быть представлены формулами для вечерних сумерек:

$$T_{ev}(t_d, \chi) = T_{0ev}(t_d) + \frac{T_{lev}}{1 + \exp\left[\frac{\chi - \chi_{ev}(t_d)}{\Delta\chi_{ev}(t_d)}\right]},$$

и утренних:

$$T_{mo}(t_d, \chi) = T_{0mo}(t_d) + \frac{T_{ldw}}{1 + \exp\left[-\frac{\chi - \chi_{mo}(t_d)}{\Delta\chi_{mo}(t_d)}\right]}.$$

Сезонные вариации параметров этих формул в зависимости от дня года t_d имеют аппроксимацию:

$$T_{0ev}(t_d) = 166 + 23.5 \cos \frac{2\pi}{365} t_d + 10.5 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 91) + 4.6 \cos \frac{6\pi}{365} t_d, \text{ К},$$

$$T_{lev}(t_d) = 97 + 23.6 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 182) + 1.9 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 182), \text{ К},$$

$$\chi_{ev}(t_d) = 101^\circ + 4.1^\circ \cos \frac{2\pi}{365} t_d,$$

$$\Delta\chi_{ev}(t_d) = 6.8^\circ + 2.2^\circ \cos \frac{2\pi}{365} t_d,$$

$$T_{0mo}(t_d) = 176 + 8.6 \cos \frac{2\pi}{365} t_d + 3.0 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 74) + 1.2 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 105), \text{ К}$$

$$T_{lmo}(t_d) = 75 + 4.4 \cos \frac{2\pi}{365} t_d, \text{ К}$$

$$\chi_{mo}(t_d) = 95^\circ, \quad \Delta\chi_{mo}(t_d) = 1.6^\circ.$$

Сопоставление средних вариаций логарифма измеренной интенсивности с температурой эмиссии (0-1) 1.58 мкм в течение вечерних и утренних сумерек позволили выявить высокую степень их соответствия, для которой коэффициенты корреляции превышали значения 0.9.

Данные наблюдений эмиссии ИКАО₂ дают возможность оценки высотного распределения содержания озона мезосферы в сумеречный период [Липатов, 2013].

Пример расчета высотного распределения содержания озона в мезосфере в течение вечернего периода суток для марта 2010 г. на основе эмпирической модели вариаций параметров эмиссии ИКАО₂ показан на рис. 5. Охватываемые диапазоны высот,

представленные на рисунке, уменьшающиеся, естественно, для различных условий освещения Солнцем верхней атмосферы, тем не менее, свидетельствуют об общем характере высотного распределения концентрации озона во всем диапазоне высот выше стратосферы. Точки – данные измерений на спутнике AURA (рис. 6), прерывистая линия – стандартное распределение озона. Полученное высотное распределение содержания озона согласуется с предшествующими данными на основе измерений на спутнике SME, использовавшего измерения эмиссии ИКАО₂ 1.27 мкм [Thomas et al., 1984].

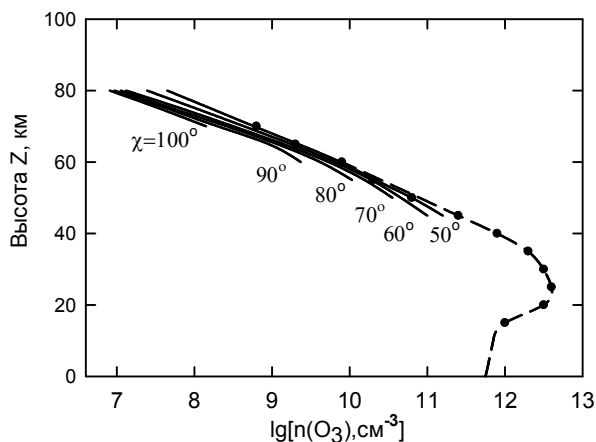


Рис. 5. Пример высотного распределения содержания озона на высотах 45 – 80 км для различных зенитных углов Солнца в вечерние сумерки (март 2010 г.). Точки – данные измерений на спутнике AURA 10 марта 2010 г., широта 56°N, долгота 36°E, местное время 13.00, зенитный угол Солнца 60°. Прерывистая линия – стандартное распределение концентрации озона.

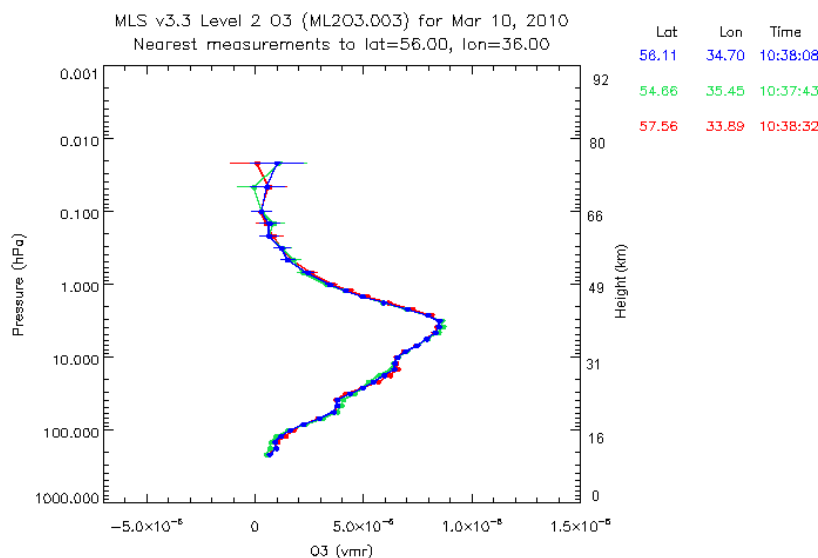


Рис. 6. Высотное распределение озона, полученное с помощью спутника AURA для условий, указанных на Рис. 5: время 13.00, зенитный угол Солнца 60°. Прерывистая линия – стандартное распределение концентрации озона.

(http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daacbin/G3/gui.cgi?instance_id=mls)

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы **основные результаты** проведенных исследований:

1. Разработан и введен в действие комплекс спектрофотометрической аппаратуры на базе инфракрасного спектрографа СП-50 и согласованного с ним линейного инфракрасного приемника излучения на ПЗС структурах для автоматической регистрации спектров излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода $a^1\Delta_g - X^3\Sigma_g^-$ (1.27 и 1.58 мкм).

2. В течение 2009 – 2011 г.г. на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН проведены регулярные наземные спектрофотометрические измерения спектров Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода в области 1.2 – 1.6 мкм. Накоплен материал измерений интенсивности и температуры эмиссии 1.58 мкм с экспозициями 1 мин в течение сумеречных и ночных условий для зенитных углов Солнца вечерние сумерки 90° – полночь – 90° утренние сумерки.

3. Собраны и систематизированы данные спутниковых, ракетных, баллонных, самолетных и наземных измерений интенсивности эмиссий 1.27 мкм и 1.58 мкм, выполненных в Канаде, США, Бразилии и Японии в течение периода 1957 – 1986 г.г. для дневных и сумеречных условий для зенитных углов Солнца утренние сумерки 97° – полдень – 97° вечерние сумерки.

4. Проведен статистический анализ всего массива полученных данных. Получены эмпирические аналитические закономерности вариаций интенсивности, для различных зенитных углов Солнца в течение суток, в зависимости от сезонов года, географической широты, уровня солнечной и геомагнитной активности. Сделаны оценки многолетних изменений интенсивности в течение периода 1960-2011 г.г.

5. Анализ опубликованных результатов, связанных с измерениями высотного распределения объемной интенсивности эмиссии 1.27 мкм за период 1966-2002 гг. дал возможность выявить статистические закономерности вариаций параметров излучающего слоя (высота и объемная интенсивность максимума излучающего слоя, его полуширина и асимметрия) в зависимости от зенитного угла Солнца для вечерних и утренних условий. Получены аппроксимации их вариаций.

6. В результате впервые в мире проведенных измерений вращательной температуры полосы (0-1) 1.58 мкм ИКАО₂ получены закономерности ее вариаций в ночной период суток для различных месяцев года. На основе данных о вариациях высоты слоя и спутниковых данных о высотных профилях температуры средней атмосферы выявлено хорошее совпадение измеренных вариаций температуры для различных месяцев

года с температурами средней атмосферы на соответствующих высотах излучающего слоя.

7. Выявлена высокая степень корреляции суточных вариаций температуры и логарифма интенсивности эмиссии 1.58 мкм. Получены аналитические формулы сезонных вариаций их регрессионной зависимости.

8. В итоге проведенных исследований эмиссии Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода впервые разработана эмпирическая модель вариаций ее параметров – интенсивности, высоты излучающего слоя и температуры средней атмосферы на высотах 40-100 км – от зенитного угла Солнца в течение суток, сезонов года. Выявлены многолетний отрицательный тренд интенсивности, зависимость от солнечной и геомагнитной активности. Эти данные являются основой определения содержания озона средней атмосферы на высотах 40-100 км.

9. На основе полученной эмпирической модели вариаций параметров эмиссии ИКАО₂ выполнен расчет высотного распределения содержания озона мезосферы в сумеречный период.

Список цитируемой литературы

- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 37. № 2. С. 81-90. 1997.
- Семенов А.И., Перминов В.И., Липатов К.В., Хомич В.Ю. Оценка сезонных изменений интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51 № 3. С. 419-424. 2011.
- Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Шефов Н.Н. Закономерности вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм // Геомагнетизм и аэрномия. 2000. Т. 40, № 6. С. 107–111.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Gattinger R.L., Vallance Jones A. The ${}^1\Delta_g - {}^3\Sigma_g^-$ O₂ bands in the twilight and day airglow // Planet. Space Sci. V. 14. N 1. P. 1-14. 1966.
- Hunten D.M. Spectroscopic studies of the twilight airglow // Space Sci. Rev. V. 6. N 4. P. 493-573. 1967.
- Noxon J.F. A global study of O₂(${}^1\Delta_g$) airglow: day and twilight // Planet. Space Sci. V. 30. N 6. P. 545-557. 1982.
- Pick D.R., Llewellyn E.J., Vallance Jones A. A twilight airglow measurements of the OH and O₂ bands by means of balloon-borne instruments // Canad. J. Phys. V. 49. N 7. P. 897-905. 1971.
- Thomas R.J., Barth C.A., Rusch D.W., Sanders R.W. Solar Mesosphere Explorer Near-Infrared Spectrometer: measurements of 1.27 μ radiation and the inference of mesospheric ozone // J. Geophys. Res. V. 89. N D6. P. 9569-9580. 1984.
- Wright P.C., Gadsden M. Dayglow of the infrared atmospheric band system of O₂ during a total eclipse of the sun // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. N 5. P. 717-730. 1975.

Список научных работ, опубликованных по теме диссертации

- Lipatov K.V.. Empirical model of the intensity variations of the Infrared Atmospheric System of O₂ at the middle atmosphere // Abstract. 34th Annual Apatity Seminar “Physics of Auroral phenomena” (1-4 March, 2011). Preprint PGI-11-01-127. Kola Science Center Russian Academy of Sciences. Apatity: P.49. 2011.
- Шефов Н.Н., Липатов К.В. Исследование излучения Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода верхней атмосферы Земли // Абстракт. Международный Симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (С.Петербург, 21-24 июня 2011 г.). С.Петербург-Петродворец: С. . 2011.
- Липатов К.В. Эмпирическая модель вариаций интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода средней атмосферы // Международная научно-техническая конференция «Наука и образование – 2011» . Мурманск: ФГОУ ВПО Мурманский государственный технический университет, С. 240-245. 2011.
- Семенов А.И., Перминов В.И., Липатов К.В., Хомич В.Ю. Оценка сезонных изменений интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51 № 3. С. 419-424. 2011.
- Липатов К.В., Перминов В.И. Эмпирическая модель вариаций Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52 № 4. С. 541-553. 2012.
- Semenov A.I., Lipatov K.V., Perminov V.I., Shefov N.N. Empirical model of variations of the intensity, altitude of emissive layer and temperature of Infrared Atmospheric system emission of molecular oxygen of the terrestrial upper atmosphere // Abstract. 39th Conference Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Poland, Sopot, 20-24 August, 2012). Sopot: P.3. 2012.
- Липатов К.В. Эмпирическая модель вариаций Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 2. Высота излучающего слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53 № 1. С. 110-118. 2013.
- Перминов В.И., Липатов К.В. Эмпирическая модель вариаций Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 3. Температура // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53 № 3. С 343-354. 2013.
- Семенов А.И., Липатов К.В., Перминов В.И., Шефов Н.Н. Модель вариаций озона мезосферы по измерениям излучения Инфракрасной атмосферной системы молекулярного кислорода // Докл. АН. Т.449. № 3. С. 342-345. 2013.

Список статей в журналах, входящих в список ВАК

- Липатов К.В. Эмпирическая модель вариаций интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода средней атмосферы // Международная научно-техническая конференция «Наука и образование – 2011» . Мурманск: ФГОУ ВПО Мурманский государственный технический университет, С. 240-245. 2011.
- Семенов А.И., Перминов В.И., Липатов К.В., Хомич В.Ю. Оценка сезонных изменений интенсивности Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51 № 3. С. 419-424. 2011.
- Липатов К.В., Перминов В.И. Эмпирическая модель вариаций Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52 № 4. С. 541-553. 2012.
- Липатов К.В. Эмпирическая модель вариаций Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 2. Высота излучающего слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53 № 1 . С. 110-118. 2013.

- Перминов В.И., Липатов К.В. Эмпирическая модель вариаций Инфракрасной Атмосферной системы молекулярного кислорода. 3. Температура // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53 № 3. С. 343-354. 2013.
- Семенов А.И., Липатов К.В., Перминов В.И., Шефов Н.Н. Модель вариаций озона мезосферы по измерениям излучения Инфракрасной атмосферной системы молекулярного кислорода // Докл. АН. Т.449. № 3 . С.342-345. 2013.