

УДК 550.388

ИЗЛУЧЕНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ – ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИНДИКАТОР СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ ПРОЦЕССОВ. ИТОГИ ЗА 60 ЛЕТ (ОБЗОР)

© 2011 г. А. И. Семенов, Н. Н. Шефов

Учреждение РАН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Москва

e-mail: anasemenov@yandex.ru; nikoshefov@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.10.2010 г.

Излагаются основные результаты, полученные за истекшие 60 лет в основных направлениях исследований излучения верхней атмосферы в ночных, сумеречных и дневных условиях на высотах выше 80-ти км, и обсуждается их связь с другими областями атмосферы и солнечными процессами.

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних шестидесяти лет активность исследований физики верхней атмосферы чрезвычайно расширилась. Важная роль в этих работах принадлежит ее собственному излучению, существование которого стимулировало возникновение нового научного направления, получившего название аэрономия, (от “аэро” (греч.) – воздух и “номос” (лат.) – закон), т.е. раздела астрофизики планетных атмосфер, рассматривающего совокупность физико-фотохимических, гидродинамических процессов, происходящих в разреженной, слабо ионизованной газовой среде под воздействием УФ излучения Солнца (звезды) и корпускулярных потоков, взаимодействующих с магнитным полем планеты и Солнца.

Осознание факта существования ранее не известного явления – собственного свечения земной атмосферы на больших высотах возникло к концу второго десятилетия XX-го столетия в результате оценки интенсивности ночного излучения неба. Первые такие работы показали, что излучение звезд в видимой области спектра составляет только часть общей интенсивности свечения ночного неба. Современные данные [Роч и Гордон, 1977] показывают, что для видимой области спектра величина суммарного звездного излучения составляет ~10 килорэлей и ~7 килорэлей для собственного излучения верхней атмосферы при спокойных геомагнитных условиях на средних широтах.

В первоначальный период наиболее легко исследуемым излучением была эмиссия атомарного кислорода 557.7 нм. Такие измерения в течение 1923–1934 гг. провел Рэлей [Hernandez and Silverman, 1964] в Терлинге ($\varphi = 52.0^\circ\text{N}$, $\lambda = 359.0^\circ\text{E}$). Эпизодические измерения велись на ряде станций. Некоторые результаты исследований звездной составляющей в общей интенсивности свечения ночного неба изложены в работе Хвостикова [1948].

В 1933 г. в Советском Союзе по инициативе академика С.И. Вавилова начались первые исследования собственного излучения верхней атмосферы Земли. В 1936 г. на Кавказе вблизи Эльбруса ($\varphi = 43.3^\circ\text{N}$, $\lambda = 42.5^\circ\text{E}$) начались первые наблюдения собственного излучения ночного неба, которые возглавил И.А. Хвостиков. В этот период определялись вариации интенсивности зеленой эмиссии атомарного кислорода и ряд ее оптических свойств, обнаружена сумеречная флуоресцентная эмиссия натрия 589.0–589.6 нм [Хвостиков, 1948]. Однако технические возможности первоначального периода измерений ограничивались только призменными спектральными приборами, имевшими малую дисперсию в красной и ближней инфракрасной областях спектра и малой чувствительностью использовавшихся приемников излучения.

В эти же годы проводились наблюдения эмиссий атомарного кислорода 557.7 и 630 нм во Франции на обсерваториях Верхний Прованс ($\varphi = 43.9^\circ\text{N}$, $\lambda = 5.7^\circ\text{E}$), Китт Пик ($\varphi = 31.8^\circ\text{N}$, $\lambda = 248.4^\circ\text{E}$), и ряде других.

В Советском Союзе реальным создателем научного направления исследований свечения ночного неба и полярных сияний и его руководителем в течение 40 лет стал Валерьян Иванович Красовский (14.06.1907 г.–04.12.1993 г.) [Голицын и др., 2007]. В конце 1940-х гг. В.И. Красовский впервые применил для исследований инфракрасного излучения ночного неба электронно-оптические преобразователи, разработкой которых он занимался в предшествующие годы и получил Сталинскую премию. При помощи таких приборов ночного видения в марте 1948 г. были получены первые спектрограммы в области спектра 600–1200 нм с низкой дисперсией [Красовский, 1950 а,б]. Они показали, что спектр излучения неба имеет структуру молекулярных полос, и оно распределено по всей ближней инфракрасной области спектра. отождествление его природы сделал

Г. Герцберг (25.12.1904 г.—03.03.1999 г.) по результатам спектрографических исследований [Meinel, 1950 a,b]. Это способствовало активизации исследований свечения верхней атмосферы во всем мире. Вскоре Д.Р. Бейтс (18.10.1916 г.—05.01.1994 г.) и М. Николе (26.02.1912 г.—08.10.1996 г.) [Bates and Nicolet, 1950] создали основы фотохимической теории возникновения гидроксильного излучения в результате озono-водородной реакции. Поэтому с 1950 г. фактически и начались весьма активные исследования собственного излучения верхней атмосферы, в котором гидроксильная эмиссия имеет преобладающую энергию и поэтому наиболее значима. В 1950 г. В.И. Красовский предложил механизм возникновения гидроксильного излучения за счет взаимодействия колебательно возбужденного молекулярного кислорода с атомарным водородом [Красовский, 1951a], а также указал на механизм возникновения континуального излучения в реакции окиси азота и атомарного кислорода [Красовский, 1951 б].

Приближение очередного 19-го одиннадцатилетнего цикла вариаций солнечной активности явилось важным стимулом для организации международных исследований верхней атмосферы, о которой в этот период существовали весьма приблизительные представления. В связи с этим была предусмотрена достаточно широкая программа спектрофотометрических и оптических исследований полярных сияний и свечения ночного неба на ряде станций и обсерваторий академических учреждений, вошедших как составная часть обширных геофизических исследований по программе Международного Геофизического Года (1957—1959 гг.).

Кроме этого, планировавшиеся космические исследования в этот же период требовали знаний о характеристиках верхней атмосферы на высотах выше 100 км, о которых были только весьма приблизительные представления, тем более о влиянии на них солнечной активности. Единственным индикатором состава и плотности в этом диапазоне высот могло быть излучение самой верхней атмосферы, поскольку ни ракетных, ни космических средств, для исследования свойств верхних слоев атмосферы в то время еще не было.

Накопленные результаты, связанные с исследованиями физики верхней атмосферы при помощи различных методов, в том числе и с помощью измерений характеристик эмиссий верхней атмосферы, публиковались во многих зарубежных журналах, таких как *Planetary and Space Science*, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, *Journal of Geophysical Researches*. В Советском Союзе для публикаций новых данных геофизических исследований был создан новый журнал *Геомагнетизм и аэрoномия* в 1961 г., выполняющий большую задачу по популяризации в научном мире достижений отечественных исследователей. За прошедшие годы число публика-

ций в нашей стране и за рубежом, посвященных исследованиям в области физики средней и верхней атмосферы, составило многие тысячи, которые невозможно процитировать в данном итоговом изложении.

2. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Спектральные и яркостные характеристики собственного излучения верхней атмосферы содержат в себе важную информацию о температуре, химическом составе исследуемого источника, а также о физико-химических процессах, вызвавших это излучение.

Для успешного решения задачи, связанной с регистрацией спектров слабого излучения верхней атмосферы, необходимо применение спектрографической аппаратуры с большой дисперсией и светосилой. Было совершенно очевидно, что первоначально использовавшиеся призменные спектрографы исчерпали свои возможности. В нашей стране, в конце 1940-х гг., по инициативе В.И. Красовского, в ГОИ были разработаны, а затем, в начале 1950-х гг., изготовлены уникальные светосильные дифракционные спектрографы СП-47, СП-48, СП-49 и СП-50, специально предназначенные для регистрации слабых световых излучений от УФ до ближней ИК области спектра [Герасимова и Яковлева, 1956; Капорский и Николаева, 1969]. Эти приборы обусловили не только саму возможность исследований в Советском Союзе собственного излучения верхней атмосферы, но и обеспечили эффективное накопление в течение последующих десятилетий высококачественного спектрографического материала об эмиссиях на отечественных геофизических станциях и астрономических обсерваториях, и сохранили свою уникальную значимость до настоящего времени. Используемая первоначально фотографическая регистрация спектров в настоящее время сменилась на матричные электронные приемники излучения, обеспечивающие цифровой характер получаемых данных.

К началу Международного геофизического года (МГГ) (1957—1959 гг.) этими спектрографами были оснащены следующие станции наблюдений: Лопарская ($\varphi = 68.3^\circ\text{N}$, $\lambda = 33.1^\circ\text{E}$) Полярного геофизического института АН СССР, Рошино ($\varphi = 60.2^\circ\text{N}$, $\lambda = 29.6^\circ\text{E}$), Звенигород ($\varphi = 55.8^\circ\text{N}$, $\lambda = 36.8^\circ\text{E}$), Института физики атмосферы АН СССР, Якутск ($\varphi = 63.0^\circ\text{N}$, $\lambda = 129.5^\circ\text{E}$), Института космофизических исследований и аэрoномии ЯФ СО АН СССР, Каменское плато — Алма-Ата ($\varphi = 43.2^\circ\text{N}$, $\lambda = 76.9^\circ\text{E}$), Астрофизического института АН Казахской ССР, Абастуманская астрофизическая обсерватория АН Грузинской ССР ($\varphi = 41.8^\circ\text{N}$, $\lambda = 42.8^\circ\text{E}$), Ванновский — Ашхабад ($\varphi = 38.0^\circ\text{N}$, $\lambda = 58.4^\circ\text{E}$) Физико-технического института АН Туркменской ССР. Уже в тот период для

регистрации спектров излучения в видимой и инфракрасной области применялись электронно-оптические преобразователи. Создание такой сети станций определило на многие десятилетия регулярный характер отечественных наблюдений.

В различных странах, участвующих в программах МГГ, также сформировались станции наблюдений в широком диапазоне широт: Саскатун ($\varphi = 52.1^\circ\text{N}$, $\lambda = 253.3^\circ\text{E}$), Калгари ($\varphi = 51.0^\circ\text{N}$, $\lambda = 245.9^\circ\text{E}$), Верхний Прованс ($\varphi = 43.9^\circ\text{N}$, $\lambda = 5.7^\circ\text{E}$), Фритц Пик ($\varphi = 39.9^\circ\text{N}$, $\lambda = 254.5^\circ\text{E}$), Китт Пик ($\varphi = 31.8^\circ\text{N}$, $\lambda = 248.4^\circ\text{E}$), Халеакала ($\varphi = 20.7^\circ\text{N}$, $\lambda = 203.8^\circ\text{E}$), несколько станций в Японии ($\varphi \sim 32^\circ\text{N}$, $\lambda \sim 135^\circ\text{E}$), Таманрассет ($\varphi = 22.8^\circ\text{N}$, $\lambda = 5.5^\circ\text{E}$), Пуна ($\varphi = 18.5^\circ\text{N}$, $\lambda = 73.9^\circ\text{E}$), и ряд других. В последующие годы образовалось ряд пунктов наблюдений в Англии, Швеции, Болгарии, Аргентине, Бразилии, Перу.

За истекшие годы существовало 21 ракетных полигонов для проведения исследований эмиссионных слоев на различных высотах [Baker and Stair, 1988; Шефов и др., 2006; Khomich et al., 2008]. Наибольшее количество пусков (40) было посвящено исследованиям эмиссии 557.7 нм. Для других эмиссий количество ракетных измерений было меньше. Тем не менее, эти результаты содержали важные сведения для разработки статистических моделей вариаций различных эмиссий.

Организация и проведение спектрофотометрических измерений потребовали решения серьезной проблемы, связанной с обеспечением сети станций наблюдений квалифицированными специалистами, которые бы имели полное представление обо всех сложностях выполняемой работы и умели бы ставить и решать поставленные задачи. Эту проблему наше государство решило за счет активного привлечения выпускников вузов, владеющих астрофизической, спектроскопической и радиофизической специальностями. В дальнейшем, в университетах были созданы специализированные кафедры, готовящие специалистов для исследований в области физики атмосферы.

С начала МГГ главным направлением исследований были регулярные и систематические измерения. Они имели постоянную государственную поддержку, велись одновременно на многих станциях, регистрируя собственное излучение верхних слоев атмосферы в различных областях спектра. При этом работа всех станций координировалась Междугосударственным геофизическим комитетом при Президиуме АН СССР, что позволяло решать различные геофизические задачи. Уже в то время проводимые исследования были ориентированы на использование регистрируемых характеристик различных эмиссий для изучения состава, температурного и динамического режима верхних слоев атмосферы, а также поиску связей между разнообразными геофизиче-

скими процессами, происходящими в нижних и верхних слоях атмосферы Земли.

За истекшие годы объем проведенных исследований чрезвычайно расширился. Было получено много научных результатов, коренным образом изменивших прежние представления о свойствах земной атмосферы и окружающем ее пространстве.

3. ОБНАРУЖЕНИЕ НОВЫХ ЭМИССИЙ

Первые практические испытания новых спектральных приборов, начатые весной 1955 г. на Звенигородской научной станции ИФА РАН, сразу же показали их значительное превосходство перед существующими отечественными и зарубежными спектрографами. При этом были получены новые результаты, обеспечившие научный приоритет по весьма многим направлениям. Первым примером была регистрация Ю.И. Гальпериным сумеречной эмиссии натрия с высоким спектральным разрешением компонентом дублетной структуры, которое раньше не достигалось, в том числе и в работах зарубежных исследователей. В результате начатых регулярных наблюдений еще до начала МГГ с целью освоения новых приборов в декабре 1956 г. В.С. Прокудина [1959] впервые обнаружила постоянное присутствие в излучении ночного неба водородной эмиссии H_α 656.3 нм с узким контуром — интенсивность $\sim 15\text{--}20$ рэлей. Ее природа оказалась обусловленной флуоресценцией солнечного излучения L_β 102.7 нм на атомарном водороде протяженной геокороны. Многолетние наблюдения этой эмиссии составили важную часть программы исследований ее пространственно-временного распределения [Марцваладзе, 1972; Фишкова, 1983; Шефов и др., 2010].

По наблюдениям в Звенигороде была впервые обнаружена новая, ранее не известная в излучении атмосферы, флуоресцентная эмиссия гелия 1083 нм во время интенсивного, освещенного Солнцем, красного низкоширотного полярного сияния 11 февраля 1958 г. (интенсивность ~ 60 килорэлей), и дана ее теоретическая интерпретация. Позже было выявлено, что эта эмиссия присутствует и в отсутствие полярных сияний, возникая на высотах 300—2000 км с интенсивностью для сумеречных условий 1000 рэлей [Shefov, 1961]. Результаты дальнейших исследований этой эмиссии рассмотрены в работах [Торошелидзе, 1991; Kerr et al., 1996; Шефов и др., 2006, 2009 а,б; Khomich et al., 2008]. В апреле 1957 г. в видимой и ближней ИК областях спектра было выявлено континуальное излучение (интенсивность $\sim 10\text{--}20$ рэлей nm^{-1}). В июле 1957 г. был открыт эффект уменьшения остаточной интенсивности фраунгоферовых линий солнечного спектра при рассеянии солнечного излучения в земной атмосфере [Шефов, 1959]. Впоследствии этот эффект был объяснен результатом многократного рассеяния сол-

ОН(5.1) ОН(6.2) O₂(0.1) ОН(7.3) ОН(8.4) ОН(3.0)ОН(9.5)

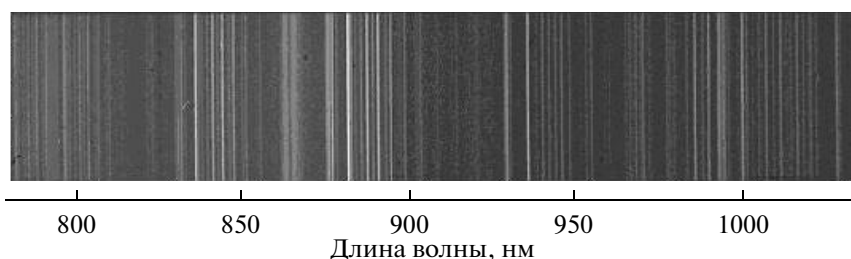


Рис. 1. Спектр излучения ночной верхней атмосферы в ближней инфракрасной области спектра. Сверху указаны полосы излучения молекул гидроксила и кислорода.

нечного излучения [Макушев, 1999]. Многолетние исследования гидроксильного излучения позволили обнаружить новое явление — “композиционные волны”, распространяющиеся из зоны сияний к экватору после геомагнитных бурь [Shefov, 1969].

Накопление фотографических спектрограмм излучения верхней атмосферы, в том числе и в период МГГ, позволило в 1962 г. создать в Институте физики атмосферы АН СССР “Атлас спектра излучения ночного неба $\lambda\lambda$ 3000–12400 Å”. Атлас был представлен на Международном симпозиуме Международного астрономического союза и Международного союза геодезии и геофизики “Теоретическая интерпретация эмиссий верхней атмосферы” в Париже в 1962 г., и затем опубликован в журнале *Planetary and Space Science* по инициативе его главного редактора профессора Д.Р. Бейтса [Krassovsky et al., 1962]. На рис. 1 приведен пример спектра свечения ночного неба в ближней ИК области спектра, полученный в Звенигороде при помощи матричных приемников излучения.

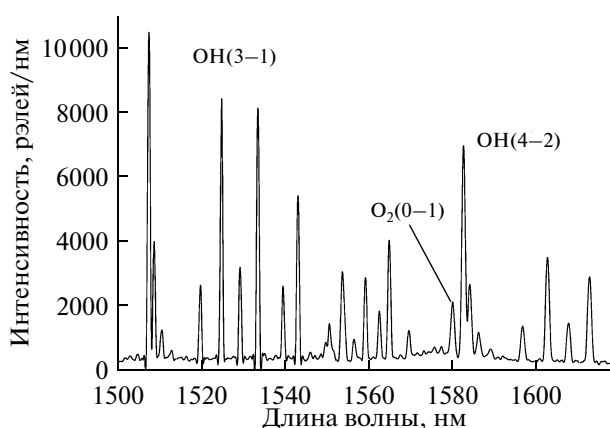


Рис. 2. Регистрограмма спектра излучения полосы ОН(3–1) ветви *Q* и *P*, ОН(4–2) ветви *R*, *Q* и *P*, и Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода $a^1\Delta_g - X^3\Sigma_g^-$ полоса (0–1) 1.58 мкм, ветвь *Q*. Температура 260 К. Звенигород, 16.02.2010 г. 18:54, экспозиция 1 мин.

В 1957 г. в Канаде было начато изучение Инфракрасной Атмосферной системы молекулы кислорода 1.27, 1.58 мкм [Vallance Jones and Harrison, 1958; Evans et al., 1988]. В дальнейшем исследования этого атмосферного излучения были продолжены в Звенигороде при помощи ПЗС приемника. Пример регистрограммы эмиссии 1.58 мкм и полос излучения гидроксила показан на рис. 2.

Летом 1962 г. впервые одновременно с появлением серебристых облаков были проведены наземные измерения температуры атмосферы в области мезопаузы (160 К) по гидроксильному излучению [Шефов, 1965].

На станции Лопарская активно исследовались характеристики спектров полярных сияний типов А и В, водородное излучение H_α с доплеровским уширением, его пространственно-временное распределение. Целенаправленные исследования на этой станции водородной эмиссии полярных сияний (интенсивность ~ 200 – 600 рэлей), имеющей широкий и смещенный в коротковолновую область контур, позволили разработать теорию вторжения протонов из магнитосферы в верхние слои атмосферы Земли. Результаты этих исследований были представлены на Ассамблее научного комитета по проведению Международного Геофизического Года и X Ассамблее Международного астрономического союза, проходивших в Москве в августе 1958 г. [Galperin, 1963].

10–11 февраля 1958 г. имело место знаменитое красное полярное сияние, интенсивность свечения красной кислородной эмиссии 630 нм в котором составляло 100 мегарэлей (~ 300 эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) [Manring and Pettit, 1959]. Можно предположить, что такое увеличение интенсивности могло быть вызвано значительным увеличением температуры в области полярного сияния. Так, например, интерферометрические измерения температуры верхней атмосферы по доплеровскому профилю эмиссии атомарного кислорода 630 нм, выполненные Т.М. Мулярчик [1960], обнаружили во время красных полярных сияний увеличение температуры атмосферы до 3500 К. Позже подобные результаты были получены с помощью

спутников и другими интерферометрическими измерениями [Игнатъев и Югов, 1995].

Эти новые результаты вызвали большой интерес зарубежных ученых, принимавших участие в работе научных Ассамблей, проходивших в 1958 г. в Москве. Для них было организовано посещение Звенигородской научной станции. Среди них были известные ученые С. Чепмен, Г. Герцберг, М. Николе, Ч. Раманатан, Дж. Чемберлен, Д. Барбье. ЗНС посетил также английский ученый Д.Р. Бейтс.

Важным индикатором динамики на высотах мезопаузы являются щелочные металлы — натрий 589.3 нм (регулярно присутствующий) и литий 670.8 нм, который может служить индикатором при искусственных распылениях в верхней атмосфере. Его изотоп ${}^6\text{Li}$ появляется в случае произведения в атмосфере ядерных взрывов, что и было использовано в Советском Союзе для этих целей (рис. 3).

С начала МГГ особенно усилились исследования собственного излучения и оптических явлений атмосферы по многим направлениям. За истекшие годы объем проведенных исследований чрезвычайно расширился. Было получено много научных результатов, коренным образом изменивших прежние представления о свойствах земной атмосферы и окружающем ее пространстве.

4. ОСНОВОПОЛОЖНИКИ АЭРОНОМИИ И НОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате возникшей потребности исследований излучения, возникающего в атмосферной разреженной слабо ионизованной среде при температурах 150–1000 К на высотах 80–1000 км, сформировалось понятие аэрономии, как раздела фотохимии, изучающего процессы взаимодействия ультрафиолетового излучения Солнца с компонентами планетной атмосферы. Эмиссии различных компонентов верхней атмосферы отображают связанные с ними процессы возникновения. Таким образом, зная фотохимическую природу регистрируемой эмиссии и условия ее регистрации, можно получить конкретные сведения о составе и температурном режиме атмосферы на высотах эмиссионного слоя на определенном высотном диапазоне. Четыре выдающихся ученых Г. Герцберг (Канада), В.И. Красовский (СССР), М. Николе (Бельгия) и Д.Р. Бейтс (Англия) практически обеспечили развитие проблемы аэрономии и возможность теоретического и экспериментального исследования излучения верхней атмосферы.

Работы Г. Герцберга были посвящены теоретическим и лабораторным исследованиям спектров излучения атомов и двухатомных молекул, в частности молекул кислорода, без знания которых было бы невозможно проводить исследования свойств эмиссий различных атмосферных компонентов.

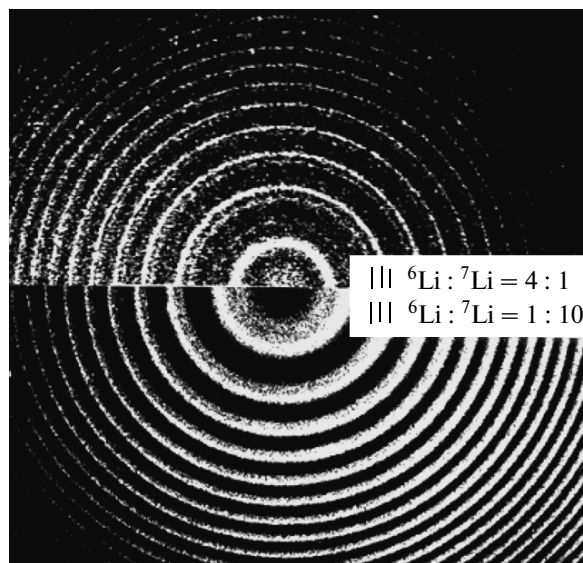


Рис. 3. Сравнение двух интерферограмм с эмиссиями изотопов лития ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$, полученных после ядерных испытаний в атмосфере.

Роль В.И. Красовского определяется большим научным и организационным вкладом в развитие экспериментальных и теоретических методов исследований состава, термического и динамического режимов верхних слоев атмосферы Земли с помощью ее собственного свечения. Им была инициирована разработка уникальной спектрографической аппаратуры, позволившей впервые создать развернутую сеть пунктов спектрографических наблюдений на территории СССР. В результате появилась возможность осуществить комплексную программу многолетних и скоординированных исследований, в результате которых было открыто много ранее не известных эмиссий и явлений. Красовским была разработана теория излучения гидроксидов, и положено начало новому направлению — исследованию внутренних гравитационных волн в атмосфере с помощью разработанного им оптического метода (зарегистрирован, как открытие нового метода обнаружения и регистрации ВГВ в верхней атмосфере по вариациям характеристик ее собственного излучения (Свидетельство на открытие № 209 от 21 декабря 1978 г. с приоритетом от 10 января 1972 г.)).

М. Николе внес важный вклад в решение различных проблем фотохимии и анализа многочисленных реакций в атмосфере [Nicolet, 1971]. Им были выполнены многочисленные лабораторные измерения, результаты которых опубликованы во многих журналах.

Д.Р. Бейтс — ведущий специалист и теоретик в области квантовой механики, выполнивший расчеты эффективных сечений и скоростей многочисленных фотохимических реакций. Это позволило ис-

пользовать характеристики эмиссий верхней атмосферы в качестве эффективных и результативных индикаторов состояния верхней атмосферы и ее изменчивости в сложной системе солнечно-земных взаимодействий. Он предложил метод исследования свойств атмосферы при помощи распыления в ней флуоресцирующих реагентов, который до настоящего времени активно используется для получения сведений о состоянии атмосферы на различных высотах.

Особенность земных условий состоит в том, что преобладающая часть излучения верхней атмосферы в ночных, сумеречных и дневных условиях обусловлена компонентами, образующимися вследствие фотодиссоциации молекулярного кислорода. Для спокойных геомагнитных ситуаций практически все излучение мезопаузы и нижней термосферы обеспечивается метастабильными переходами молекулы кислорода.

Важная роль различных метастабильных состояний атомов и молекул кислорода, и излучений с них, несмотря на их малую интенсивность, состоит в индикации высот, на которых происходят соответствующие реакции преобразования энергии, а также различных типов динамических явлений.

Как показали результаты исследований различных эмиссий за прошедшие годы, первые сведения об их свойствах не являлись достаточной информацией для необходимых заключений о закономерностях поведения и развития различных явлений в атмосфере. Поэтому усилия многих коллективов на широкой сети научных обсерваторий и станций были направлены на накопление материала наблюдений [Yao, 1962]. Однако, после окончания международных программ Международного Геофизического Года (1957–1959 гг.) вскоре была осуществлена программа Международного Года Спокойного Солнца (1964–1965 гг.), затем Международного Года Активного Солнца (1969–1971 гг.), Международного Года Магнитосферы (1976–1979 гг.). В последние годы в период максимума 23-го цикла солнечной активности был организован Полярный Год (2007–2008 гг.).

Наиболее длительные и систематические исследования за истекшие годы 1950–2010 гг. проводились на Звенигородской научной станции ИФА РАН в период 1955–2010 гг., Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузии в 1948–2000 гг., Институте космических исследований и аэронауки ЯФ СО РАН в 1957–2010 гг., на станции Адвентдален, Шпицберген ($\varphi = 78.2^\circ\text{N}$, $\lambda = 16.3^\circ\text{E}$) в 1980–2009 гг.

Исследование излучения верхней атмосферы за истекший период не ограничивалось регистрацией естественных эмиссий. Спектрофотометрические возможности применяемой аппаратуры имели возможность обнаружения эмиссий, присутствие которых в верхней атмосфере обуславливалось искусственными воздействиями, причинами которых были специальные распыления оптически активных

атомов и молекул вследствие их флуоресценции в солнечном излучении. Такими компонентами являлись натрий 5893 нм, литий 6708 нм, нейтральный 553.5 нм и ионизованный 455.4 нм и 493.4 нм барий, AlO 464–470 нм, 484–490 нм, 508–514 нм, этилен C₂H₆ [Шефов и др., 2006; Khomich et al., 2008]. Кроме этого, в атмосфере появлялись эмиссии элементов, сопровождавших ядерные испытания, такие как изотоп лития ⁶Li (рис. 3). Регистрация эмиссии лития без идентификации именно изотопа ⁶Li после американских ядерных взрывов в 1962 г. производилась в Канаде [Hunten et al., 1967].

5. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭМИССИЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

В итоге многолетних систематических исследований в различных отечественных и зарубежных научных учреждениях, начавшихся в период МГГ, в течение последующих десятилетий был накоплен материал наблюдений различной длительности (от 5–10 до 30–50 лет) различных характеристик эмиссий верхней атмосферы.

Необходимо отметить, что полученные результаты измерений в различные годы, как правило, публиковались без статистической систематизации. При этом главное внимание уделялось попыткам проведения теоретических построений на основе моделей состава атмосферы, разработанных на базе данных, не соответствующих на данный момент рассматриваемым условиям измерений.

Систематизация регулярных вариаций различного временного масштаба за истекший период началась с середины 1990-х годов в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН на основе использования всех доступных данных, полученных как у нас в стране, так и за рубежом, охватывающих период в несколько десятков лет. Следует иметь в виду, что под регулярными вариациями следует понимать вариации, которые могут быть вычислены для данного места и времени на основе заданных геофизических условий. В результате проведенной работы были получены статистические закономерности вариаций характеристик различных эмиссий от времени и солнечно-геомагнитной активности. Такие исследования охватывают все типичные ночные и сумеречные эмиссии в диапазоне высот от 80 до 10000 км: гидроксила OH 520–1800 нм (87 км), Атмосферной системы O₂ 864.5 нм (92 км), натрия 589.3 нм (93 км), Инфракрасной Атмосферной системы O₂ 1580 нм (50–100 км), атомарного кислорода 557.7 нм (97 км), 630 нм (270 км), гелия 1083 нм (300–2000 км), водорода 656.3 нм (200–10000 км). Наиболее полное изложение результатов таких исследований представлено в работах [Шефов и др., 2006; 2009 а,б; 2010; Khomich et al., 2008]. Полученные закономерности легли в основу эмпириче-

ских моделей вариаций характеристик различных эмиссий — интенсивность, температура и высота излучающего слоя, которые в настоящее время широко используются при анализе и сопоставлениях данных, полученных на различных станциях в разных гелиогеофизических условиях.

6. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ЭМИССИЙ

Пространственная неоднородность ночного излучения верхней атмосферы была обнаружена на основе данных измерений эмиссий атомарного кислорода 557.7 нм и 630 нм, начатых в 1950-х годах [Роч и Гордон, 1977]. Было выявлено, что пространственное распределение интенсивности их свечения имеет достаточно сложный динамический характер. В нашей стране регулярные наблюдения начались в период МГГ в Туркмении на ст. Ванновский вблизи Ашхабада. На базе полученных данных были определены различные статистические закономерности динамики поведения пространственного распределения интенсивности эмиссий 557.7 и 630.0 нм (пятнистость эмиссий). Как следует из работы [Коробейникова и Насыров, 1972], размеры пятен для эмиссии 557.7 нм составляют от 10 до 1000 км, средний размер — около 90 км. Средний размер крупномасштабных неоднородностей около 1000 км. Поведение интенсивностей пятен обладает определенными закономерностями. Частота распределения логарифма интенсивности пятен имеет нормальное распределение [Коробейникова и Насыров, 1972]. Амплитуда интенсивности пятен относительно среднего фона в среднем составляет 20–30%, но бывает и больше. Эти свойства обуславливаются процессами вихревой диффузии, и их закономерности отчетливо прослеживаются по результатам измерения вариаций площадей пятен [Коробейникова и др., 1984]. Впоследствии, при помощи спутников отчетливая неоднородность пространственной структуры излучающего слоя была подтверждена [Ross et al., 1992].

Первоначальная попытка статистической систематизации вероятностей распределения интенсивностей пятен, их размеров и скоростей движения показала, что они представляют собой асимметричные функции, которые удовлетворительно аппроксимировались логнормальным распределением [Шефов и др., 2006; Khomich et al., 2008]. Теоретические рассмотрения процессов диффузии пассивной примеси в случайном поле скоростей приводят к выводу, что плотности вероятностей скоростей изменения наблюдаемых характеристик атмосферы описываются логнормальными распределениями [Кляцкин, 1994].

7. ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

С той поры, когда в 1960-х годах в периоды испытаний мощных атомных и термоядерных зарядов в атмосфере были зарегистрированы грандиозные возмущения в верхней атмосфере, стало обычным предполагать, что в основном ВГВ генерируются в тропосфере или на ее границе во время активных метеорологических процессов. Такие волны сравнительно беспрепятственно проникают в верхнюю атмосферу. Это отличает их от звуковых волн, которые за редким исключением не распространяются вверх из-за отражения от горячей озоносферы. Однако, помимо случаев со взрывами, экспериментально не было доказано, когда и от каких метеорологических образований возникают ВГВ. Правда, иногда предполагалось, что они генерируются в самой верхней атмосфере во время очень сильных геомагнитных возмущений.

Атмосферные волны, которые имеют такое название, обусловлены действием архимедовых сил плавучести в атмосфере с переменной по высоте плотностью. Периоды внутренних гравитационных волн (ВГВ) превышают некоторый минимальный предел — период Бранта–Вайсяля τ_g (в пределах 0–100 км $\tau_g \sim 5.1$ мин). Первые предположения о связи наблюдаемых периодических вариаций параметров эмиссий верхней атмосферы с волновыми процессами в атмосфере были высказаны в работах Красовского [Krassovsky, 1957; Красовский, 1957]. Наблюдения серебристых облаков показывали разнообразные волновые структуры, хотя на эти особенности первоначально не обращалось внимание.

Позже, при использовании камеры всего неба, обзорающей с помощью светофильтра определенный эмиссионный слой, регистрировалась волновая структура в нем, обусловленная воздействием ВГВ [Taylor and Hargood, 1990]. Пример такой регистрации волновой структуры эмиссионного поля гидроксила показан на рис. 4 [Гаврильева и Аммосов, 2001].

Надо заметить, что наблюдаемая волновая структура в эмиссионном слое и ее связь с ВГВ была понята только в начале 1960-х годов. В 1972 г. в работе [Krassovsky, 1972] была разработана теория для оценки параметров ВГВ по наблюдениям быстрых вариаций интенсивности и вращательной температуры гидроксильного излучения, на основе которых определялось соотношение

$$\frac{\Delta I}{I} = \eta \frac{\Delta T}{T}.$$

Параметр η , получивший название первого числа Красовского, определяет соотношение относительных вариаций интенсивности и температуры при адиабатических процессах, возникающих в слое излучения при распространении в нем ВГВ. Характерные значения этого параметра зависят от

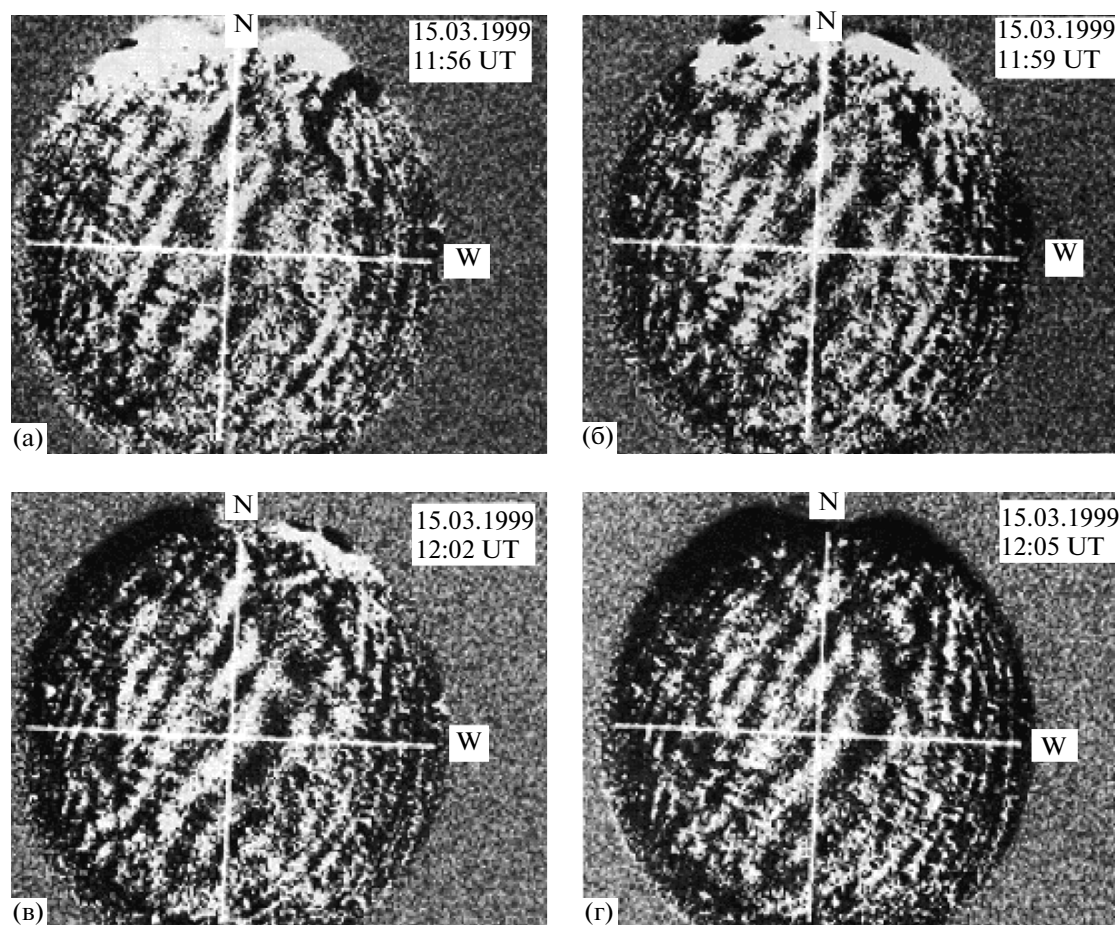


Рис. 4. Пример структур волновых полей гидроксильного излучения, полученных как разности последовательных кадров, усиливающих контраст изображения. Длинные волны (~26 км) двигались к юго-западу со скоростью ~25 м с⁻¹. Почти ортогонально к нему движется структура типа “рыба”.

типа фотохимического процесса образования возбужденных молекул гидроксила. Для озono-водородной реакции $\eta_{\text{O}_3} = 2.45$, для перегидроксильной $\eta_{\text{HO}_2} = 1.7$.

Второй параметр, связанный с распространением ВГВ, второе число Красовского θ , определяет временное запаздывание вариаций интенсивности относительно вариаций температуры. Оно также зависит от типа фотохимического процесса возбуждения данной эмиссии.

Исследования характеристик ВГВ при помощи наблюдений эмиссии ОН были выполнены при помощи трехазимутального метода измерений излучения гидроксила в трех участках излучающего слоя, удаленных друг от друга на 200 км [Krasovskiy et al., 1977]. Позже, распространение ВГВ в верхней атмосфере было зарегистрировано при помощи распыления искусственных светящихся облаков, вытянутых в высотном диапазоне 110–170 км [Клюев, 1985]. Масштаб волновых изменений температуры

составлял около 10 км, которые соответствовали периодам ВГВ в несколько десятков минут.

8. ИССЛЕДОВАНИЯ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЭМИССИЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Изучение внутренних гравитационных волн, генерируемых активными метеорологическими образованиями в тропосфере и распространяющихся до высот нижней термосферы, начатое по инициативе В.И. Красовского, создало новое направление в атмосферных исследованиях — воздействия ВГВ на характеристики верхней атмосферы, возникающие при взаимодействиях атмосферных приземных воздушных потоков с рельефом земной поверхности (орографический эффект). Для определения свойств волновых возмущений в верхней атмосфере, возникающих над горным рельефом, первоначально были предприняты самолетные измерения в районе Уральских гор (~64°N). Этот горный хребет высотой около 1000 м

достаточно резко выделяется над окружающей равниной, как с западной, так и с восточной стороны. Измерения температуры гидроксильного излучения позволили обнаружить ее увеличение примерно на $\Delta T_T \sim 10$ К в подветренной области гор, а также относительное увеличение интенсивности эмиссии атомарного кислорода 630 нм $\sim 20\%$, размер области возмущения составляет ~ 200 км [Семенов и др., 1981; Шефов и др., 1983; Shefov and Pertsev, 1984; Перцев, 1989]. С 1985 г. специальные спектрофотометрические регулярные измерения были начаты в Институте физики атмосферы АН СССР на высокогорной станции ($\varphi = 43.7^\circ\text{N}$, $\lambda = 42.7^\circ\text{E}$, $Z = 2070$ м) вблизи г. Кисловодска. Место измерений находилось на расстоянии 50 км к северу от горы Эльбрус (5642 м) ($\varphi = 43.3^\circ\text{N}$, $\lambda = 42.5^\circ\text{E}$). Сопоставление максимального значения ΔT_T со скоростью ветра в тропосфере на различных высотах в наветренной стороне гор показало, что максимальный коэффициент корреляции соответствует изобарической высоте 600 мбар, ~ 4 км. Было обнаружено, что приращения вращательной ΔT_T и колебательной температур ΔT_v гидроксильного излучения изменяются в противофазе. Это означало, что увеличение вращательной температуры сопровождается уменьшением высоты излучающего слоя. Непосредственное измерение на спутнике UARS над Кавказским регионом в 1998 г. показало, что высота излучающего слоя гидроксила была ниже, чем над другими областями.

Интерферометрические измерения температуры эмиссии 630 нм атомарного кислорода над Андами в Перу вблизи Арекипа ($\varphi = 16.2^\circ\text{S}$, $\lambda = 288.6^\circ\text{E}$) [Mergwether et al., 1996] выявили ее увеличение над горным хребтом (высота которого ~ 5 км), составившее примерно 200–500 К на расстоянии ~ 430 км от хребта. Ранее оценки изменения температуры для F-области по эмиссии 630 нм для Урала и Кавказа свидетельствовали об увеличении температуры на 100 и 200 К, соответственно [Шефов и др., 2006; Khomich et al., 2008]. Пятнистая структура интенсивности эмиссии 630 нм над Гавайскими островами [Роч и Гордон, 1977] также, по-видимому, отображает влияние орографических возмущений.

Все полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что регистрируемые колебания представляют собой быстрые ВГВ, возникающие в атмосфере в процессе взаимодействия ветрового потока с горным рельефом.

Представленные результаты позволили построить пространственное распределение притока энергии на высотах около 90 км над подветренной областью Кавказских гор для оценки области возмущения, образующейся на высотах нижней термосферы [Шефов и др., 1999; Shefov et al., 2000].

Таким образом, горный рельеф должен отображаться в виде стационарной планетарной структуры

пространственных вариаций характеристик верхней атмосферы и ее эмиссионных слоев [Насыров, 2007; 2009]. Примеры таких эффектов уже имеются на основе спутниковых измерений на космической станции “Мир” [Шефов и др., 2006; Khomich et al., 2008].

9. МНОГОЛЕТНИЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Анализ многолетних данных ракетных, лидарных и спектрофотометрических измерений температуры средней и верхней атмосферы, позволил выявить, что в течение XX столетия, среднегодовые значения температуры на различных высотах имеют тенденции уменьшения (тренд) [Кокин и др., 1990; Golitsyn et al., 1996; Шефов и др., 2006; Khomich et al., 2008; Holt and Zhang, 2008]. Активные исследования климатических изменений в верхней атмосфере начались в 1990-е годы [Aikin et al., 1991; Пудовкин и Распопов, 1992]. Для этого использовались различные данные измерений температуры, полученные разными методами. Наиболее длительные данные о температурном режиме в области мезопаузы были получены в Советском Союзе с помощью спектрофотометрии гидроксильного излучения, начатые с 1959 г. Используя линейное приближение для интерполяции данных измерений, было выявлено многолетнее уменьшение температуры атмосферы в области мезопаузы за период 1959–1995 гг., скорость которого составила ~ -0.7 К год $^{-1}$ [Гвишвили и др., 1996; Семенов, 1996; Golitsyn et al., 1996; Семенов и др., 1996, 2000; Голицын и др., 2000; Semenov et al., 2002]. Дальнейшее расширение временного ряда данных о температуре до 2010 г. и их анализ привел к выводу о нелинейности изменения ее в течение всего периода 1959–2010 гг. [Шефов и др., 2006; Khomich et al., 2008] Причем, была обнаружена сезонная особенность тренда. В зимнее время в области мезопаузы за наблюдаемый период наблюдался тренд температуры от ~ -0.9 К год $^{-1}$ (1959–1985 гг.) до ~ -0.2 К год $^{-1}$ (1985–2010 гг.). В летнее время тренд был близок к нулю. Использование данных измерений температуры во всем диапазоне средней атмосферы при помощи ракет, лидаров и различных эмиссий была установлена высотная изменчивость тренда [Kubicki et al., 2006].

Необходимо отметить, что регулярные измерения за рубежом начались только с 1980-х годов. Поэтому сопоставление этих данных с результатами измерений с 1959 г. показало, что в период 1980–2010 гг. значения тренда, имея отрицательные значения, систематически уменьшались по абсолютной величине, а не были такими в течение предшествующего интервала лет (рис. 5). Поэтому зарубежные исследователи, имеющие более короткие временные ряды наблюдений, охватывающие в основном последние годы, приводят сведения о практическом отсутствии тренда за этот период [Laštovička, 2005].

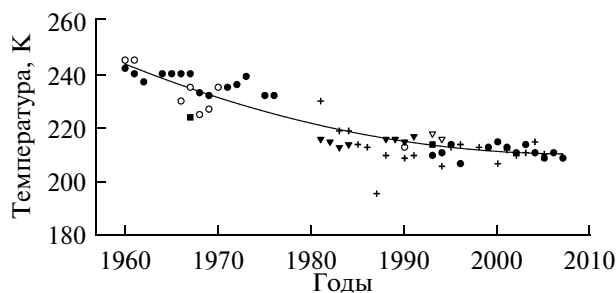


Рис. 5. Многолетние вариации температуры в зимние периоды на основе различных данных. Точки – Звенигород, обратные сплошные треугольники – Вупперталь, кружки – Якутск, обратные полые треугольники – Майнупт, квадраты – Квебек и Делавар, крестики – Шпицберген. Сплошная линия – аппроксимация.

Вследствие многолетнего систематического уменьшения температуры средней и верхней атмосферы за рассматриваемый период (1959–2010 гг.) должно происходить и уменьшение ее общей концентрации на различных высотах. Полученные высотные профили температуры показали понижение высот, имеющих постоянное значение температуры, что указывало на постепенное оседание средней и верхней атмосферы за рассматриваемый период [Семенов, 2000]. Под оседанием понимается понижение высот слоев атмосферы, имеющих определенные заданные значения плотности.

Использование данных измерений различными методами температуры и плотности средней атмосферы и верхней атмосферы позволило установить, что на протяжении рассматриваемого периода (~50 лет) происходило систематическое оседание всей верхней атмосферы (рис. 6). Как видно, логарифм скорости оседания линейно растет с логарифмом высоты в интервале от 80 до 500 км. Эта аппроксимация имеет вид

$$r(Z, t) = -90 \left(\frac{Z}{100} \right)^{1.1} \exp\left(-\frac{t-1960}{20} \right),$$

где $r(Z, t)$ измеряется в м год^{-1} , Z – высота (км), t – номер года, коэффициент корреляции равен 0.87 ± 0.08 .

10. ОТКЛИК ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В последние годы большое внимание уделяется проблеме, связанной с реакцией температуры средней атмосферы на солнечную активность [Veig et al., 2003]. Это вызвано необходимостью учета этого эффекта в современных моделях средней атмосферы.

В результате была разработана методика обработки и анализа данных о температурном режиме средней атмосферы, полученных с помощью ракет и спектрофотометрии ряда эмиссий ее собственного излучения в течение нескольких 11-летних циклов солнечной активности [Семенов и др., 2005]. В линейном приближении скорости приращения температуры под воздействием солнечной активности имеет вид:

$$\Delta T(Z) = \delta T_F(Z) \frac{F_{10.7} - 130}{100},$$

где $\delta T_F(Z) = dT/dF$ – изменение температуры на высоте Z при $\Delta F_{10.7} = 100 \text{ sfu}$, а $\Delta T(Z)$ измеряется в К.

На основе отечественных многолетних ракетных и спектрофотометрических температурных измерений с привлечением данных норвежских измерений на о-ве Шпицберген построена модель широтного и высотного распределения отклика среднемесячных значений температуры средней атмосферы (30–100 км) на солнечную активность. Модель позволила выявить, что для низких широт характерным является положительная реакция температурного режима на солнечную активность на высотах 50–70 км (достигающая $+9 \text{ K}/100 \text{ sfu}$). Для области высот 30–50 км отклик температуры практически нулевой для зимнего периода и отрицательный для летнего ($\sim -2 \text{ K}/100 \text{ sfu}$). Выше 70 км наблюдается тенденция отрицательного отклика температуры в течение всех месяцев года.

Для среднеширотной атмосферы на высотах 55–70 км изменения $\delta T_F(Z)$ самые наименьшие ($\sim +2 \text{ K}/100 \text{ sfu}$ для зимы и $-1 \text{ K}/100 \text{ sfu}$ для равноденствий). На стратосферных высотах 30–55 км заметные изменения существуют зимой и весной ($\sim +5 \text{ K}/100 \text{ sfu}$). Наибольшие сезонные вариации отмечаются на высотах 80–95 км (для зимних условий $-5 \text{ K}/100 \text{ sfu}$ и для летних $+8 \text{ K}/100 \text{ sfu}$). Следует отметить хорошее совпадение среднегодовых значений отклика температуры мезопаузы на солнечную активность, полученных на средних широтах в Вуппертале ($\varphi = 51.3^\circ \text{N}$; $\lambda = 7.2^\circ \text{E}$) [Offermann et al., 2002.] и Звенигороде.

Для высоких широт характерным является отрицательная реакция температурного режима на солнечную активность на высотах стратосферы и положительная на высотах мезосферы, не освещаемых солнечным излучением в течение длительного периода полярной ночи. Выявленный характер поведения $\delta T_F(Z)$ очевидно обусловлен особенностями высотных распределений ряда химически активных газовых компонентов и воздействующего УФ излучения Солнца, во многом определяющих высотные профили температуры.

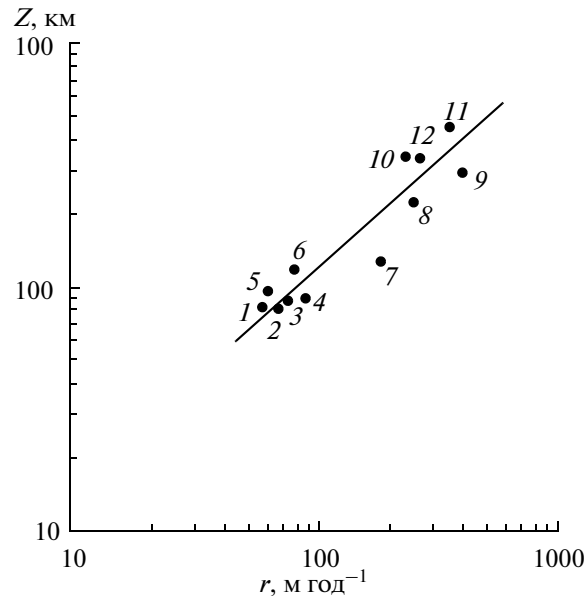


Рис. 6. Скорость оседания верхней атмосферы на различных высотах [Семенов и др., 2000]. Кружки – данные измерений: 1 – слой *D* ионосферы [Taubenheim et al., 1997]; 2 – рассеяние сумеречного света в области мезопаузы на высоте 85 км [Мегрелишвили и Торошелидзе, 1999]; 3 – высота радиометеорного отражения [Семенов и др., 2000]; 4 – высота слоя озона в мезопаузе [Семенов, 1997; Shefov and Semenov, 2002]; 5 – высота слоя атомарного кислорода на основе эмиссии 557.7 нм [Семенов, 1997]; 6 и 7 – масс-спектрометрические измерения содержания атомарного кислорода на высотах 120 и 130 км, соответственно [Похунков и др., 2003]; 8 – эмиссия атомарного кислорода 630 нм; 9 и 10 – данные ионосферных измерений высоты слоя *F2* [Ulich and Turunen, 1997] и [Bremer, 1998], соответственно; 11 – торможение спутников [Keating et al., 2000; Emmert et al., 2004, 2008; Волков и Суевалов, 2005]; 12 – данные радара некогерентного рассеяния [Holt and Zhang, 2008]. Сплошная линия – линия регрессии.

11. ВОЗДЕЙСТВИЕ КВАЗИДВУХЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИЗЛУЧЕНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Все процессы в земной атмосфере определяются воздействием солнечной радиации. Оно предопределяет все разнообразие в сложной системе солнечно-земных связей. Зависимости параметров эмиссий верхней атмосферы от уровня солнечной активности учитывались при разработках эмпирических моделей вариаций. В последние годы большое внимание уделялось попыткам выявления проявлений вариаций характеристик солнечного излучения (квазидвухлетних) на характеристики вариаций параметров атмосферных эмиссий. Их существование было выявлено в 1984 г. Такого характера вариации были обнаружены как в свойствах стратосферы, так и геомагнитного поля. Важной особенностью таких вариаций в солнечной атмосфере при исследовании их временных закономерностей оказался временной сдвиг в несколько месяцев при сопоставлении квазидвухлетних вариаций индексов чисел Вольфа *W*, соответствующих уровню фотосферы, и потока радиоизлучения *F10.7*, соответствующего высотам 100000 км в солнечной короне [Apostolov and Letfus, 1985]. Этому соответствовала скорость распространения такого квазидвухлетнего возмущения, равная 20 м с^{-1} .

Анализ вариаций температуры ΔT эмиссий атомарного кислорода 557.7 нм, натрия 589.3 нм и гид-

роксила с 1965 по 1995 гг. обнаружил четкую корреляцию с поведением циклических цугов колебаний с изменяемым периодом (“апериодических”) индекса $\Delta F10.7$ относительно среднего изменения *F10.7* в течение одиннадцатилетнего цикла. Это означает, что такие вариации обусловлены вариациями УФ излучения Солнца. Их характер описывается функцией Эйри [Абрамовиц и Стиган, 1979]. Для высот термосферы по данным об эмиссии 630 нм было показано, что в течение солнечного цикла происходят вариации частоты наблюдений красных сияний (ΔN_{SAO} , в год), которые также описываются функцией Эйри [Евлашин, 2005].

Природа таких процессов связана с гидродинамикой атмосферы на вращающихся планетах и Солнце. В этом случае на поверхности небесного тела возникает меридиональное течение [Монин, 1988]. В области широт 40–50° инерционные колебания, порождаемые нарушениями равновесия между силой инерции в движении атмосферы относительно вращающейся Земли или Солнца, и силой инерции в переносном движении, образуют пространственный цуг, закономерность вариаций амплитуды в котором описывается функцией Эйри. Как следует из широтного распределения солнечных пятен на уровне фотосферы в течение 11-летнего цикла (“бабочки Маундера”) появление первых пятен нового цикла как раз соответствует не только началу нового цикла, но и одновременному образо-

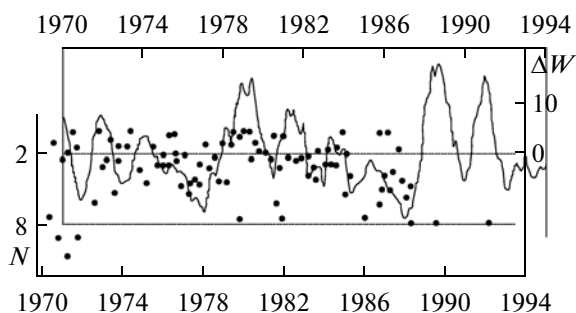


Рис. 7. Сопоставление квазидвухлетних вариаций солнечной активности (сплошная линия) [Кононович и Шефов, 2003] и солнечных нейтрино (точки — сглаженные с фильтром 1 : 3 : 5 : 3 : 1, данные [Sakurai, 1979]).

ванию цуга аperiodических колебаний [Кононович и Шефов, 2003].

Важную роль в анализе этого процесса играют наблюдаемые вариации потока нейтрино. Как показало сопоставление циклических аperiodических вариаций чисел Вольфа ΔW и потока нейтрино N , эти вариации происходят в противофазе, причем вариации нейтрино запаздывают на 1.4 года (рис. 7). Коэффициент корреляции этих рядов в интервале 1974–1982 гг. в этом случае равен $r = -0.84$. Такой факт означает, что возникший на уровне нижней части конвективной зоны ($R_S \approx 0.7$) цуг создал волновые возмущения, направленные к поверхности и к центру Солнца. Изменения давления в области ядра модулируют поток нейтрино.

12. ПРЕДСТОЯЩИЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные многочисленные результаты исследований верхней атмосферы с помощью ее собственного излучения, проводившихся во многих странах, позволили приблизить наше знание к пониманию тенденций развития многочисленных явлений в атмосфере, обусловленных сложной системой солнечно-земных связей. Однако, это не означает, что все проблемы уже решены.

Одной из важных проблем, например, является исследование закономерностей поведения характеристик излучения 5.3 мкм окиси азота в результате процесса

$$\text{NO}(X^2\Pi, v=1) \rightarrow \text{NO}(X^2\Pi, v=0) + hv(\lambda 5.3 \text{ мкм}), A_{1-0} = 13.38 \text{ с}^{-1},$$

возникающего на высотах 100–150 км [Ballard et al., 1993]. Этой реакции принадлежит важная роль в стоке энергии из верхней атмосферы во время красных полярных сияний [Krassovsky, 1968; Красовский, 1971].

Также актуальным остается продолжение исследований закономерностей поведения температуры верхней атмосферы в течение XXI-го века, которые наиболее чувствительно отображают воздействия как естественных, так и антропогенных факторов на климатические процессы земной атмосферы. Кроме этого, в работах [Башкирцев и Машнич, 2003; Комитов и Кафтан, 2003] указывается на недооценку влияния солнечной активности на климат Земли. Например, в соответствии с прогнозом средних вариаций солнечной активности на протяжении ближайших нескольких десятилетий следует ожидать существенного глобального похолодания до -0.5 К , которое может продолжаться около 60-ти лет [Абдусаматов, 2007; Лаптухов и Лаптухов, 2010]. Такое явление должно иметь сходство с известным минимумом Маундера в XVII-ом веке.

13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетних исследований излучения верхней атмосферы позволили обнаружить и произвести теоретический анализ многих ранее неизвестных явлений в процессах солнечно-земных связей. Это дало возможность получить сведения о широком спектре закономерностей поведения характеристик средней и верхней атмосферы на различных высотах, определяемых гелио-геофизическими условиями. Только при условии статистически значимых эмпирических свойств различных атмосферных процессов можно получить надежные теоретические модели рассматриваемых явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдусаматов Х.И. Об уменьшении потока солнечного излучения и понижении глобальной температуры Земли до состояния глубокого похолодания в середине XXI века // Изв. Крым. астрофиз. обс. Т. 103. № 4. С. 292–298. 2007.
- Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 832 с. 1979.
- Башкирцев В.С., Машнич Г.П. Ожидает ли нас глобальное потепление в ближайшие годы? // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 43. № 1. С. 132–135. 2003.
- Волков И.И., Суевалов В.В. Оценка многолетних вариаций плотности верхней атмосферы Земли в минимумах солнечной активности по эволюции параметров орбит ИСЗ // Астрон. вестн. Т. 39. № 2. С. 177–183. 2005.
- Гаврильева Г.А., Аммосов П.П. Наблюдения распространения гравитационных волн в инфракрасном свечении всего неба // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 41. № 3. С. 375–381. 2001.
- Герасимова Н.Г., Яковлева А.В. Комплект светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. № 1. С. 83–86. 1956.
- Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Сергеев Н.П., Фишкова Л.М., Ше-

- фов Н.Н.* Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 32. № 3. С. 329–339. 1996.
- *Голицын Г.С., Семенов А.И., Шефов Н.Н.* Сезонные вариации многолетнего тренда температуры в области мезопаузы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 40. № 2. С. 67–70. 2000.
- *Голицын Г.С., Семенов А.И., Шефов Н.Н., Темный В.В., Евлашин Л.С., Есипов В.Ф.* В.И. Красовский – основоположник отечественной школы исследований физики верхней атмосферы (к 100-летию со дня рождения) // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. № 3. С. 427–429. 2007.
- *Евлашин Л.С.* Аперриодические вариации частоты наблюдений красных полярных сияний в течение 11-летнего цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 45. № 3. С. 411–415. 2005.
- *Игнатьев В.М., Югов В.А.* Интерферометрия крупномасштабной динамики высокоширотной термосферы / Под ред. Н.Н. Шефова. Якутск: Якут. науч. центр СО РАН. 209 с. 1995.
- *Капорский Л.Н., Николаева И.И.* Оптические приборы. Каталог / Под ред. В.А. Никитина. М.: Машиностроение, Т. 4. 305 с. 1969.
- *Клюев О.Ф.* Измерения температуры термосферы по спектрам молекул АЮ // Тр. ИЭМ. Физика верхней атмосферы / Под ред. Ю.И. Портнягина, Ю.К. Часовитина. М.: Гидрометеиздат, № 16(115). С. 15–25. 1985.
- *Кляцкин В.И.* Статистическое описание диффузии пассивной примеси в случайном поле скоростей // Успехи физ. наук. Т. 164. № 5. С. 531–544. 1994.
- *Кокин Г.А., Лысенко Е.В., Розенфельд С.Х.* Изменения температуры страто- и мезосферы в период 1964–1988 гг. по данным ракетного зондирования // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 26. № 7. С. 702–710. 1990.
- *Комитов Б.П., Кафтан В.И.* Изменения солнечной активности последних тысячелетий. Возможен ли очередной долгодлительный солнечный минимум? // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 43. № 4. С. 592–601. 2003.
- *Кононович Э.В., Шефов Н.Н.* Тонкая структура одиннадцатилетней цикличности солнечной активности // Геомагнетизм и аэронаука. 2003. Т. 43. № 2. С. 166–173.
- *Коробейникова М.П., Насыров Г.А.* Исследование эмиссии ночного неба λ 5577 Å за 1958–1967 гг. в Ашхабаде. Ашхабад: Ылым, 100 с. 1972.
- *Коробейникова М.П., Чунчужов Е.П., Шефов Н.Н.* Горизонтальная вихревая диффузия вблизи турбопаузы по наблюдениям эмиссии 557.7 нм // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 20. № 10. С. 995–998. 1984.
- *Красовский В.И.* Новое об излучении ночного неба в области 8800–11000 Å // Докл. АН СССР. Т. 70. № 6. С. 999–1000. 1950 а.
- *Красовский В.И.* Природа инфракрасного излучения ночного неба // Докл. АН СССР. Т. 73. № 4. С. 679–682. 1950 б.
- *Красовский В.И.* О механизме свечения ночного неба // Докл. АН СССР. Т. 77. № 3. С. 395–398. 1951 а.
- *Красовский В.И.* Влияние паров воды и окислов углерода и азота на свечение ночного неба // Докл. АН СССР. Т. 78. № 4. С. 669–672. 1951 б.
- *Красовский В.И.* Природа изменений интенсивности эмиссий земной атмосферы // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. № 5. С. 664–669. 1957.
- *Красовский В.И.* Штили и штормы в верхней атмосфере (Физика верхней атмосферы и околоземного пространства). М.: Наука. 135 с. 1971.
- *Лантухов А.И., Лантухов В.А.* Различия температур воздуха в годы максимума и минимума солнечной активности и его механизм // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 50. № 3. С. 392–400. 2010.
- *Макуашев М.К.* Об эффекте замыкания Фраунгоферовых линий в атмосфере // Докл. АН. Т. 365. № 6. С. 824–825. 1999.
- *Марцваладзе Н.М.* Пространственное распределение эмиссии $H\alpha$ верхней атмосферы Земли, ее вариации в течение солнечного цикла и зависимость от геомагнитных возмущений // Бюлл. Абастуман. астрофиз. обсерв. / Под ред. Л.М. Фишковой, Е.К. Харадзе. № 42. С. 39–45. 1972.
- *Мегрелишвили Т.Г., Торошелидзе Т.И.* Многолетний тренд плотности мезопаузы по спектрофотометрическим наблюдениям сумерек // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 39. № 2. С. 130–132. 1999.
- *Монин А.С.* Теоретические основы геофизической гидродинамики. Л.: Гидрометеиздат, 424 с. 1988.
- *Мулярчик Т.М.* Интерферометрические измерения температуры верхней атмосферы по ширине некоторых эмиссионных линий // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. № 3. С. 449–458. 1960.
- *Насыров Г.А.* Орографически обусловленные вариации интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 47. № 1. С. 107–110. 2007.
- *Насыров Г.А.* Орографически обусловленные вариации интенсивности эмиссии атомарного кислорода 630 нм // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 49. № 4. С. 554–557. 2009.
- *Перцев Н.Н.* Азимутальная анизотропия горных подветренных волн в верхней атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 25. № 6. С. 585–591. 1989.
- *Похунков А.А., Рыбин В.В., Тулинов Г.Ф.* Тренд атомарного кислорода в термосфере средних и экваториальных широт // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 43. № 5. С. 688–693. 2003.
- *Прокудина В.С.* О наблюдении линии λ 6562 Å в спектре ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба / Под ред. В.И. Красовского. М.: Изд-во АН СССР. № 1. С. 43–44. 1959.
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М.* Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры (обзор) // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 32. № 5. С. 1–22. 1992.
- *Роч Ф., Гордон Дж.* Свечение ночного неба. М.: Мир. 152 с. 1977.

- Семенов А.И., Шагаев М.В., Шефов Н.Н. О воздействии орографических волн на верхнюю атмосферу // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 17. № 9. С. 982–984. 1981.
- Семенов А.И. Температурный режим нижней термосферы по эмиссионным измерениям в течение последних десятилетий // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 36. № 5. С. 90–97. 1996.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н., Фишкова Л.М., Лысенко Е.В., Перов С.П., Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Сергеенко Н.П. Об изменении климата верхней и средней атмосферы // Докл. АН. Т. 349. № 1. С. 108–110. 1996.
- Семенов А.И. Многолетние изменения высотных распределений озона и атомарного кислорода в нижней термосфере // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 37. № 3. С. 132–142. 1997.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н., Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Русина В.Я., Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Торошелидзе Т.И., Кащеев Б.Л., Олейников А.Н. Сезонные особенности многолетних трендов температуры средней атмосферы // Докл. АН. Т. 374. № 6. С. 816–819. 2000.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н., Перминов В.И., Хомич В.Ю., Фадель Х.М. Отклик температуры средней атмосферы на солнечную активность для различных сезонов года // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 45. № 2. С. 250–254. 2005.
- Торошелидзе Т.И. Анализ проблем аэронауки по излучению верхней атмосферы / Под ред. Н.Н. Шефова. Тбилиси: Мецниереба, 217 с. 1991.
- Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли / Под ред. Н.Н. Шефова. Тбилиси: Мецниереба, 272 с. 1983.
- Хвостиков И.А. Свечение ночного неба / Под ред. С.И. Вавилова. 2-ое изд. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 496 с. 1948.
- Шефов Н.Н. Интенсивности некоторых эмиссий сумеречного и ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба / Под ред. В.И. Красовского. М.: Изд-во АН СССР, № 1. С. 25–29. 1959.
- Шефов Н.Н. Эмиссии верхней атмосферы и серебристые облака // Полярные сияния и свечение ночного неба / Под ред. В.И. Красовского. М.: Изд-во АН СССР, № 11. С. 48–51. 1965.
- Шефов Н.Н., Перцев Н.Н., Шагаев М.В., Яров В.Н. Орографически обусловленные вариации эмиссий верхней атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 19. № 9. С. 920–926. 1983.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Перцев Н.Н., Суходоев В.А., Перминов В.И. Пространственное распределение притока энергии ВГВ в мезопаузу над подветренной областью горного хребта // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 39. № 5. С. 87–94. 1999.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Юрченко О.Т. Эмпирическая модель вариаций эмиссии гелия 1083 нм. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 49. № 1. С. 100–110. 2009 а.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Юрченко О.Т. Эмпирическая модель вариаций эмиссии гелия 1083 нм. 2. Температура // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 49. № 5. С. 700–709. 2009 б.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Юрченко О.Т. Эмпирическая модель вариаций эмиссии водорода 656.3 нм // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 50. № 4. С. 551–560. 2010.
- Aikin A.C., Chanin M.L., Nash J., Kendig D.J. Temperature trends in the lower mesosphere // Geophys. Res. Lett. V. 18. № 3. P. 416–419. 1991.
- Apostolov E.M., Letfus V. Quasi-biennial oscillations of the green corona intensity // Bull. Astron. Inst. Czechosl. V. 36. № 4. P. 199–205. 1985.
- Baker D.J., Stair A.T. Rocket measurements of the altitude distribution of the hydroxyl airglow // Physica Scripta. V. 37. № 4. P. 611–622. 1988.
- Ballard J., Kerridge B.J., Morris P.E., Taylor F.W. Observations of $\nu = 1-0$ emission from thermospheric nitric oxide by ISAMS // Geophys. Res. Lett. V. 20. № 12. P. 1311–1314. 1993.
- Beig G., Keckhut P., Lowe R.P., Roble R., Mlynczak M.G., Scheer J., Fomichev V., Offermann D., French W.J.R., Shepherd M.G., Semenov A.I., Remsberg E., She C.Y., Luebken F.J., Bremer J., Clemesha B.R., Stegman J., Sigernes F., Fodnavis S. Review of mesospheric temperature trends // Rev. Geophys. 2003. V. 41. № 4. 1015. doi: 10.1029/2002RG000121.
- Bates D.R., Nicolet M. The photochemistry of atmospheric water vapour // J. Geophys. Res. V. 55. № 3. P. 301–327. 1950.
- Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe // Ann. Geophys. V. 16. № 8. P. 986–996. 1998.
- Emmert J.T., Picone J.M., Lean J.L., Knowles S.H. Global change in the thermosphere: compelling evidence of a secular decrease in density // J. Geophys. Res. V. 109. № A 2. A02301, doi: 10.1029/2003 JA010176. P. 1–12. 2004.
- Emmert J.T., Picone J.M., R.R. Meier. Thermospheric global average density trends, 1967–2007, derived from orbits of 5000 near-Earth objects // Geophys. Res. Lett. V. 35. L05101. doi: 10.1029/2007GL032809. 2008.
- Evans W.F.J., McDade I.C., Yuen J., Llewellyn E.J. A rocket measurement of the O₂ Infrared Atmospheric (0-0) band emission in the dayglow and a determination of the mesospheric ozone and atomic oxygen densities // Canad. J. Phys. V. 66. № 11. P. 941–946. 1988.
- Galperin Y.I. Proton bombardment in aurora // Planet. Space Sci. V. 10. P. 187–193. 1963.
- Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P. Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere // Geophys. Res. Lett. V. 23. № 14. P. 1741–1744. 1996.
- Hernandez G.J., Silverman S.M. A reexamination of Lord Rayleigh's data on the airglow 5577 (OI) emission // Planet. Space Sci. V. 12. № 2. P. 97–112. 1964.
- Holt J.M., Zhang S.R. Long-term temperature trends in the ionosphere above Millstone Hill // Geophys. Res. Lett. V. 35. L05813. doi: 10.1029/2007GL031148. 2008.

- *Hunten D.M.* Spectroscopic studies of the twilight airglow // *Space Sci. Rev.* V. 6. № 4. P. 493–573. 1967.
- *Keating G.M., Tolson R.H., Bradford M.S.* Evidence of long term global decline in the Earth's thermospheric densities apparently related to anthropogenic effects // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 10. P. 1523–1526. 2000.
- *Kerr R.B., Noto J., Lancaster R.S., Franco M., Rudy R.J., Williams R., Hecht J.H.* Fabry Perot observations of helium 10830 Å emission at Millstone Hill // *Geophys. Res. Lett.* V. 23. № 22. P. 3239–3242. 1996.
- *Khomich V.Yu., Semenov A.I., Shefov N.N.* Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics // Berlin: Springer-Verlag, 739 p. 2008.
- *Krassovsky V.I.* Nature of the intensity variations of the terrestrial atmosphere emission // *Mém. Soc. Roy. Sci. Liege.* V. 18. № 1. P. 58–67. 1957.
- *Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I.* Atlas of the airglow spectrum $\lambda\lambda$ 3000–12400 Å // *Planet. Space Sci.* V. 9. № 12. P. 883–915. 1962.
- *Krassovsky V.I.* Heating of the upper atmosphere during geomagnetic disturbances // *Nature.* V. 217. № 5134. P. 1136. 1968.
- *Krassovsky V.I.* Infrasonic variations of the OH emission in the upper atmosphere // *Ann. Géophys.* V. 28. № 4. P. 739–746. 1972.
- *Krassovsky V.I., Potapov B.P., Semenov A.I., Shagaev M.V., Shefov N.N., Sobolev V.G., Toroshelidze T.I.* The internal gravity waves near mesopause and hydroxyl emission // *Ann. Geophys.* V. 33. № 3. P. 347–356. 1977.
- *Kubicki A., Keckhut P., Chanin M.-L., Hauchecorne A., Lysenko E., Golitsyn G. S.* Temperature trends in the middle atmosphere as seen by historical Russian rocket launches: Part 1, Volgograd (48.68°N, 44.35°E) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. № 10. P. 1075–1086. 2006.
- *Laštovička J.* Progress in trend studies: highlights of the TREND2004 Workshop // *Adv. Space Res.* V. 35. № 8. P. 1359–1365. 2005.
- *Manring E.R., Pettit H.B.* Photometric observations of the 5577 Å and 6300 Å emissions made during the aurora of February 10–11, 1958 // *J. Geophys. Res.* V. 64. № 2. P. 149–153. 1959.
- *Meinel A.B.* OH emission bands in the spectrum of the night sky. I. // *Astrophys. J.* V. 111. № 3. P. 555–564. 1950 a.
- *Meinel A.B.* OH emission bands in the spectrum of the night sky. II. // *Astrophys. J.* V. 112. № 1. P. 120–130. 1950 b.
- *Meriwether J.W., Mirick J.L., Biondi M.A., Herrero F.A., Fesen C.G.* Evidence of orographic wave heating in the equatorial thermosphere at solar maximum // *Geophys. Res. Lett.* V. 23. № 16. P. 2177–2180. 1996.
- *Nicolet M.* Aeronomic reactions of hydrogen and ozone // *Mesospheric model and related experiments* / ed. G. Fiocco. Dordrecht: D. Reidel Publ. Co. P. 1–51. 1971.
- *Offermann D., Donner M., Semenov A.I.* // We-Heraeus Seminar on trends in the upper atmosphere, Kühlungsborn. Germany. P. 38. 2002.
- *Ross M.N., Christensen A.B., Meng C.I., Carbary J.F.* Structure of the UV nightglow observed from low Earth orbit // *Geophys. Res. Lett.* V. 19. № 10. P. 985–988. 1992.
- *Sakurai K.* Quasi-biennial variation of the solar neutrino flux and solar activity // *Nature.* London. V. 278. № 5700. P. 146–148. 1979.
- *Semenov A.I.* Long-term temperature trends for different seasons by hydroxyl emission // *Phys. Chem. Earth.* V. 25. № 5–6. P. 525–529. 2000.
- *Semenov A. I., Shefov N.N., Lysenko E.V., Givishvili G.V., Tikhonov A.V.* The seasonal peculiarities of behavior of the long-term temperature trends in the middle atmosphere at the mid-latitudes // *Phys. Chem. Earth.* V. 27. № 6–8. P. 529–534. 2002.
- *Shefov N.N.* Émission de l'hélium dans la haute atmosphère // *Ann. Géophys.* V. 17. № 4. P. 395–402. 1961.
- *Shefov N.N.* Hydroxyl emission of the upper atmosphere. I. Behaviour during solar cycle, seasons and geomagnetic disturbances // *Planet. Space Sci.* V. 17. № 5. P. 797–813. 1969.
- *Shefov N.N., Pertsev N.N.* Orographic disturbances of upper atmosphere emissions // *Handbook for Middle Atmosphere Program* / Ed. J. Taubenheim. Urbana: SCOSTEP, V. 10. P. 171–175. 1984.
- *Shefov N.N., Semenov A.I., Pertsev N.N., Sukhodoev V.A.* The spatial distribution of the gravity wave energy influx into the mesopause over a mountain lee // *Phys. Chem. Earth. Pt B.* V. 25. № 5–6. P. 541–545. 2000.
- *Shefov N.N., Semenov A.I.* The long-term trend of ozone at heights from 80 to 100 km at the mid-latitude mesopause for the nocturnal conditions // *Phys. Chem. Earth.* V. 27. № 6–8. P. 535–542. 2002.
- *Taubenheim J., Entzian G., Berendorf K.* Long-term decrease of mesospheric temperature, 1963–1995, inferred from radiowave reflection heights // *Adv. Space Res.* V. 20. № 11. P. 2059–2063. 1997.
- *Taylor M.J., Hapgood M.A.* On the origin of ripple-type wave structure in the OH nightglow emission // *Planet. Space Sci.* V. 38. № 11. P. 1421–1430. 1990.
- *Ulich T., Turunen E.* Evidence for long-term cooling of the upper atmosphere in ionosonde data // *Geophys. Res. Lett.* V. 24. № 9. P. 1103–1106. 1997.
- *Vallance Jones A., Harrison A.W.* $^1\Delta_g - ^3\Sigma_g^-$ O₂ Infrared emission band in the twilight airglow spectrum // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 13. № 1/2. P. 45–60. 1958.
- *Yao I.G.* Observations of the night airglow // *Ann. IGY/ed. F.E. Roach.* London: Pergamon Press, V. 24. 322 p. 1962.