

Солнечные циклы в вариациях атмосферной эмиссии 557,7 нм

А.В. Михалев, И.В. Медведева*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, а/я 291*

Поступила в редакцию 26.08.2008 г.

Рассматриваются особенности вариаций интенсивности атмосферной эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм (высоты высвечивания 85–115 км) в различные солнечные циклы. Используются экспериментальные данные, полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) в 23-м солнечном цикле, и опубликованные результаты, полученные на других среднеширотных станциях в предыдущих солнечных циклах. Одна из наблюдаемых особенностей вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм заключается в нарушении прямой корреляционной зависимости интенсивности эмиссии от уровня солнечной активности ($F_{10,7}$) в отдельные годы. Выявлено, что особенности многолетних вариаций интенсивностей эмиссии 557,7 нм в 23-м и 20-м солнечных циклах наиболее подобны. Предпринята попытка сопоставить многолетние вариации эмиссии 557,7 нм с некоторыми климатическими глобальными и региональными индексами, потенциально отражающими вариации или особенности общей циркуляции нижележащей атмосферы. Высказано предположение, что многолетние вариации эмиссии 557,7 нм, как и нарушение синфазности между межгодовыми вариациями интенсивности эмиссии 557,7 нм и уровнем солнечной активности в отдельные годы, могут быть следствием совместного влияния солнечной активности (с периодами ~ 11 лет) и динамики нижележащей атмосферы (с периодами ~ 2–7 лет) или ее аномалиями в отдельные годы.

Ключевые слова: солнечные циклы, верхняя атмосфера, атмосферная эмиссия 557,7 нм.

Введение

Первые исследования межгодовых и многолетних вариаций среднеширотных атмосферных эмиссий верхней атмосферы относятся к 20–30-м гг. XX в. [1]. Наиболее полные данные о многолетних вариациях атмосферных эмиссий получены во второй половине XX в. (см., например, [2]), они охватывают временной интервал около 5 солнечных циклов (18–22-й солнечные циклы). К настоящему времени можно считать установленным фактом, что многолетние вариации атмосферной эмиссии в линии атомарного кислорода 557,7 нм (высоты высвечивания 85–115 км) зависят от уровня солнечной активности, имея в общем случае прямую положительную зависимость от солнечной активности [3]. При этом следует отметить, что детальный анализ данных многолетних наблюдений (см., например, [4]) позволяет предположить, что в отдельные годы нарушается прямая зависимость интенсивности атмосферной эмиссии 557,7 нм от солнечной активности.

Так, для 23-го солнечного цикла исследовалась связь интенсивности эмиссии 557,7 нм (I_G) с солнечной активностью ($F_{10,7}$) и было показано, что она имела качественно различный характер в разные фазы цикла [5]. На фазе роста и максимума солнечной активности отмечалась отрицательная корреляция

среднемесячных значений интенсивностей эмиссии 557,7 нм и индекса $F_{10,7}$, которая сменилась положительной корреляцией на фазе спада. Было высказано предположение, что нарушение корреляции среднемесячных значений интенсивностей эмиссии 557,7 нм с индексом $F_{10,7}$ на фазе роста солнечной активности в 23-м солнечном цикле связано с аномальным термодинамическим режимом средней атмосферы в 1998–2000 гг.

Цель настоящей работы заключается в выявлении аналогов поведения межгодовых вариаций I_G , наблюдавшихся в 23-м солнечном цикле [5], среди предыдущих солнечных циклов и в исследовании особенностей и аномалий физических процессов и термодинамического режима на высотах эмиссионного слоя 557,7 нм и нижележащей атмосферы, которые могут приводить к нарушению прямой зависимости от солнечной активности.

Анализируемые данные

Для анализа были использованы:

– данные экспериментальных наблюдений эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм, полученные в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д.) в 1997–2006 гг. (23-й солнечный цикл). Оптические измерения проводились с помощью зенитного фотометра «Феникс», рабочие длины волн 557,7 и 630 нм и спектральные интервалы 360–410 и 720–810 нм;

* Александр Васильевич Михалев (mikhalev@iszf.irk.ru); Ирина Викторовна Медведева.

– опубликованные в [4] данные многолетних вариаций эмиссии 557,7 нм для 18–22-го солнечных циклов;

– данные NOAA/SEC Boulder (USA) – поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см ($F_{10,7}$) (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX/);

– глобальные климатические индексы Эль-Ниньо – Ла-Нинья, Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>; http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml), Тихоокеанского декадного колебания (<http://jisao.washington.edu/pdo/>).

Результаты обработки

Первоначальная процедура обработки заключалась в определении коэффициентов корреляции 10-летнего интервала среднегодовых значений интенсивности I_G , полученного в 1997–2006 гг. (23-й солнечный цикл) в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, с 10-летними интервалами среднегодовых интенсивностей I_G многолетнего ряда (1949–1992 гг., 18–22-е солнечные циклы), и среднегодовых интенсивностей I_G , опубликованных в работе [4].

На рис. 1 показаны значения коэффициентов корреляции между 10-летним рядом I_G , полученным в ГО ИСЗФ СО РАН в 23-м солнечном цикле, и 10-летними рядами, полученными с привлечением длинного ряда I_G для 18–22-го солнечных циклов [4].

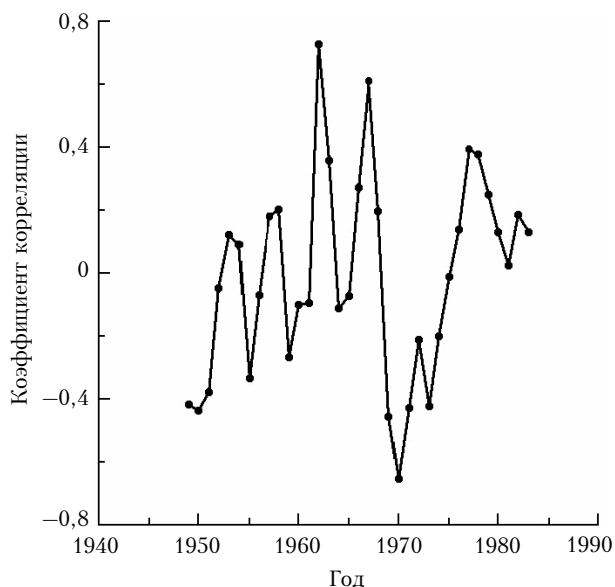


Рис. 1. Значения коэффициентов корреляции между 10-летним рядом I_G , полученным в ГО ИСЗФ СО РАН в 23-м солнечном цикле, и 10-летними рядами, полученными с привлечением длинного ряда I_G для 18–22-го солнечных циклов

Каждое последующее значение коэффициента корреляции получалось сдвигом на один год ряда I_G для 23-го солнечного цикла относительно многолетнего ряда в 18–22-м солнечных циклах. Напри-

мер, значение коэффициента корреляции за 1949 г. на рис. 1 соответствует значению коэффициента корреляции рядов за 1949–1958 и 1997–2006 гг., значение коэффициента корреляции за 1950 г. соответствует значению коэффициента корреляции рядов за 1950–1959 и 1997–2006 гг. и т.д.

Наибольшие коэффициенты корреляции получены для двух пар 10-летних рядов: 1962–1971 и 1997–2006 гг. (коэффициент корреляции 0,73) и 1967–1976 и 1997–2006 гг. (0,61). Но временной интервал 1962–1971 гг. относится к двум соседним солнечным циклам, тогда как периоды 1967–1976 и 1997–2006 гг. лежат в пределах солнечных циклов – 20-го и 23-го соответственно. И это обстоятельство позволяет 10-летние ряды 1967–1976 и 1997–2006 гг. рассматривать как наиболее подобные по характеру поведения межгодовых вариаций I_G в пределах одного солнечного цикла.

На рис. 2, а показаны межгодовые вариации I_G и потока радиоизлучения Солнца (индекс $F_{10,7}$) для 20-го и 23-го солнечных циклов и для сравнения на рис. 2, б – 21-го солнечного цикла.

Рис. 2, а позволяет сделать предварительные выводы. Межгодовые вариации I_G , подобные вариациям I_G , зарегистрированным в 23-м солнечном цикле, отмечались в 20-м солнечном цикле. Основные гармоники межгодовых вариаций I_G в эти солнечные циклы близки к 4–6 годам (5–6-летние колебания) в отличие от других солнечных циклов, например от 21-го цикла, для которого достаточно хорошо выделяется 11-летний период солнечной активности.

Обсуждение

В некоторых солнечных циклах (18–22-й циклы) можно выделить 11-летние периоды вариаций I_G , что позволяет говорить о зависимости I_G от уровня солнечной активности. В этом случае 11-летние вариации I_G эмиссии атомарного кислорода I_G могут интерпретироваться изменениями высотных распределений температуры, атомарного кислорода и других атмосферных составляющих в соответствии с изменением уровня солнечной активности. Например, согласно [3] при повышении уровня солнечной активности происходят расширение высотного распределения атомарного кислорода и смещение максимума этого распределения на более низкие высоты, что приводит к повышению интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм.

Нарушение прямой зависимости I_G от уровня солнечной активности в отдельные годы может быть обусловлено другими причинами. В настоящее время существует достаточное количество экспериментальных указаний на проявление в вариациях эмиссий верхней атмосферы процессов и явлений, источники которых локализованы в литосфере, тропосфере и стратосфере: землетрясения [6], орография [7], планетарные волны, источником которых являются особенности земного рельефа и температурные контрасты, струйные течения [3], стратосферные потепления, квазидвухлетние вариации эмиссии 557,7 нм

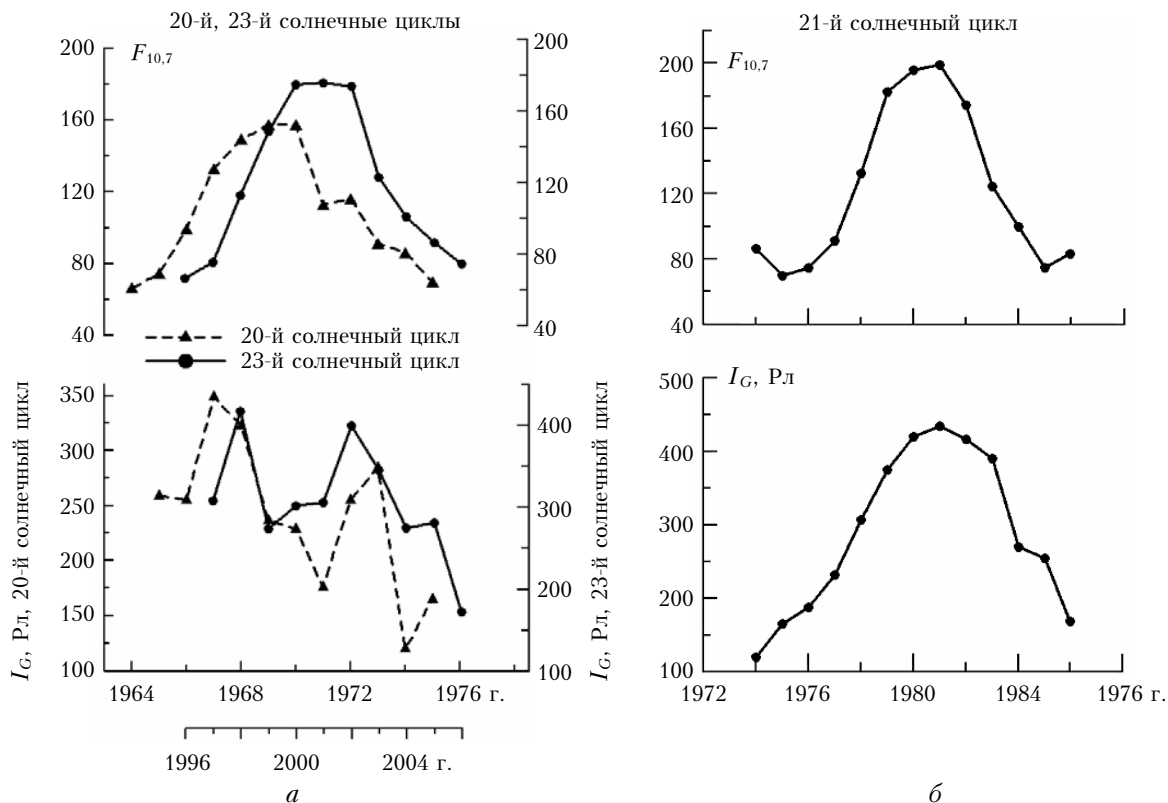


Рис. 2. Межгодовые вариации I_G и потока радиоизлучения Солнца (индекс $F_{10.7}$) для 20-го и 23-го солнечных циклов (а), и для сравнения – 21-го солнечного цикла (б)

на экваториальных широтах, ассоциируемые с зональным ветром в стратосфере [2, 8]. Известно также, что в результате динамических процессов в атмосфере Земли, включая развитие в приземном слое атмосферы сильных конвективных процессов масс воздуха, атмосфера оказывается достаточно хорошо перемешанной до термосферных высот (~110–120 км) [9]. При этом отмечается, что особенно эффективны процессы переноса тепла и количества движения планетарными волнами, вертикально распространяющимися из тропосферы. Существуют достаточные основания считать, что распространение возмущений снизу в верхнюю атмосферу существенным образом зависит от состояния и особенностей глобальной и региональной циркуляции в тропосфере и стратосфере. Так, например, распространение планетарных волн, генерируемых в нижней атмосфере, в верхнюю атмосферу зависит от величины, направления и профиля среднего зонального ветра [3, 9].

В этом случае межгодовые и многолетние вариации характеристик циркуляции тропосферы и стратосферы, модулируя процессы распространения возмущений в верхнюю атмосферу, могут находить проявление в межгодовых и многолетних вариациях характеристик верхней атмосферы и, в частности, в вариациях интенсивности эмиссии 557,7 нм. Так, в работе [10] было показано существенное увеличение I_G , полученных по многолетним наблюдениям, в периоды внезапных стратосферных потеплений. При этом важно иметь в виду, что основные периоды (квазидвухлетние, 5–6-летние) межгодовых вари-

ций некоторых параметров и характеристик в тропосфере и стратосфере не совпадают с 11-летними вариациями солнечной активности.

Учитывая отсутствие в 60–70-х гг. XX в. регулярных измерений параметров верхней атмосферы и отмеченную выше роль циркуляции в нижней атмосфере или влияющих на нее процессов, последние можно использовать в качестве возможного репера особенностей в состоянии и динамике во всей толще атмосферы в отдельные годы. В частности, на циркуляцию атмосферы могут влиять явления Эль-Ниньо/Ла-Нинья или явление Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), планетарные распределения температуры и давления. Для описания аномалий циркуляции атмосферы используются распределения температуры и давления, выражающиеся через соответствующие глобальные или региональные индексы, для которых имеются достаточно длинные ряды однородных наблюдений, включая интересующие нас 60–70-е гг. XX в.

Индексы ЭНЮК достаточно часто используют при исследовании межгодовой климатической изменчивости, включая общую циркуляцию атмосферы. Положительные значения индексов означают развитие Эль-Ниньо или теплой фазы ЭНЮК, отрицательные значения индекса соответствуют развитию холодной фазы ЭНЮК или Ла-Нинья. Явление ЭНЮК представляет собой самый большой и наиболее важный сигнал в межгодовой климатической изменчивости, наблюдается регулярно (каждые 2–7 лет). Последствия ЭНЮК проявляются в виде значимых

климатических аномалий в различных районах земного шара. Хотя по происхождению термины Эль-Ниньо и Ла-Нинья относятся к аномалиям температуры поверхности океана, в настоящее время в исследованиях ЭНЮК под названием Эль-Ниньо и Ла-Нинья понимают не просто аномалии температуры поверхности в экваториальном районе Тихого океана, но и соответствующие аномалии циркуляции атмосферы, давления и осадков в данном регионе, т.е. климатические аномалии в системе «океан–атмосфера» (<http://data.oceaninfo.ru/info/index.jsp>).

Индексы «Тихоокеанского декадного колебания» («Pacific Decadal Oscillation», ТДК) представляют средние аномалии температуры поверхности океана и приземного давления в регионе Тихого океана севернее 20° с.ш. Положительные (отрицательные) значения индексов ТДК соответствуют положительной (отрицательной) фазе ТДК. По характеру изменчивости индексов каждая фаза ТДК имеет тенденцию длиться 20–30 лет. Однако внутри этих длительных периодов отмечены и короткие, до 3 лет, интервалы противоположной фазы ТДК.

В настоящей статье мы предприняли попытку сопоставить многолетние вариации эмиссии 557,7 нм с некоторыми климатическими глобальными и региональными индексами – температурой океана в явлениях Эль-Ниньо/Ла-Нинья, индексами ЭНЮК и региональным индексом ТДК, потенциально отражающими вариации или особенности общей циркуляции атмосферы.

На рис. 3 представлены вариации среднегодовых значений индекса радиационного Солнца $F_{10,7}$, индекса ТДК (усреднение по трем годам), интенсивности зеленой эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм по данным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (23-й солнечный цикл) и данным работы [4] (18–22-й солнечные циклы) и индекса ЭНЮК (индекс ONI).

Анализ данных (см. рис. 3) позволяет сделать некоторые предварительные выводы. В общем случае периоды вариаций солнечной активности по индексу $F_{10,7}$ и индексу ТДК не совпадают. В вариациях ТДК преобладают периоды, превышающие 11-летние периоды солнечной активности, с наличием коротких периодов в несколько (< 10) лет. Нарушение прямой зависимости интенсивности эмиссии 557,7 нм от солнечной активности (индекса $F_{10,7}$) в 20-м и 23-м солнечных циклах, как и в 22-м цикле, соответствует отрицательной фазе ТДК или интервалу резкого снижения этого индекса. При положительной фазе ТДК (21-й солнечный цикл) фаза многолетних вариаций эмиссии 557,7 нм в большей степени соответствует фазе изменения солнечной активности по индексу $F_{10,7}$. При этом для 21-го солнечного цикла отмечаются наибольшие амплитуды интенсивности эмиссии 557,7 нм за весь период наблюдений. Достаточно хорошую прямую зависимость от солнечной активности можно отметить и в 19-м солнечном цикле, когда максимум короткопериодических вариаций ТДК совпал с максимумом 11-летнего цикла. Отмеченные особенности вариаций индекса ТДК в значительной степени относятся и к вариациям явления ЭНЮК (индекс ONI).

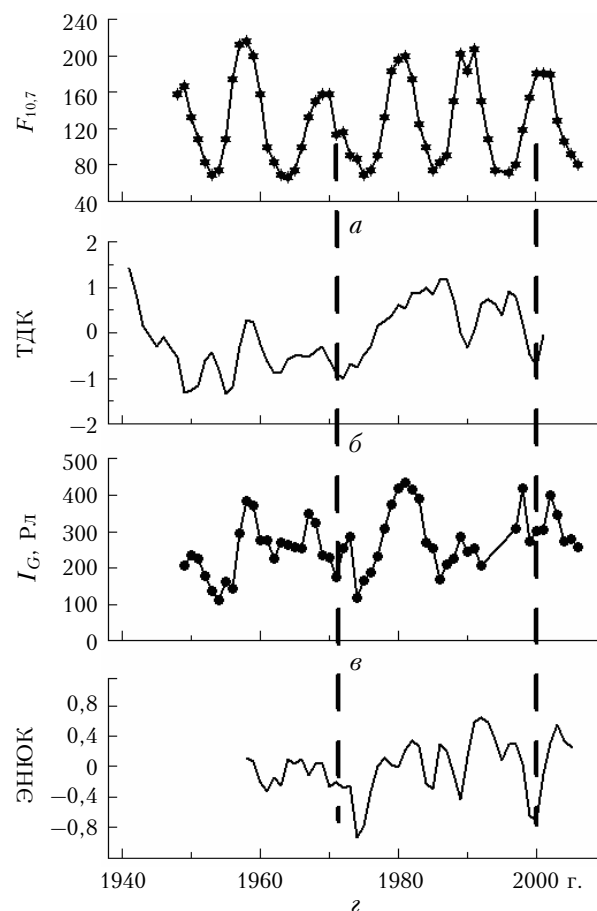


Рис. 3. Межгодовые вариации среднегодовых значений: $F_{10,7}$ (а), ТДК (б), I_G (в) и ЭНЮК (индекс ONI) (г) для 18–23-го солнечных циклов

Относительно межгодовых колебаний интенсивности эмиссии 557,7 нм можно заметить следующее. Обычно в многолетних вариациях эмиссии I_G в средних широтах присутствуют 11-летние (~20–30%), ~5,5-летние (~5%) и квазидвухлетние (~10%) колебания [11]. В экваториальных широтах основной гармоникой является квазидвухлетняя [2]. Приведенные на рис. 2, а вариации I_G могут быть интерпретированы вариациями, близкими к 5,5-летним. Их амплитуда для 23-го солнечного цикла составляет ~20% (~±70 Рл) от средней величины (~340 Рл). В этом случае гармоника 5,5-летних колебаний вариаций I_G является основной. Появление 5,5-летней гармоник вариаций I_G в качестве основной может быть результатом усиления в этом частотном диапазоне влияния нижележащей атмосферы в анализируемый интервал времени.

Колебания с периодами ~5,5 лет для эмиссии 557,7 нм отмечались и в других работах, например [12]. В этом случае интересными представляются выводы работы [13], основанные на многолетних наблюдениях сумеречного свечения атмосферы. Согласно этой работе в интервале высот 40–300 км основные компоненты сумеречной атмосферы претерпевают долгопериодные колебания с периодами 4,5–6 и 11 лет. Причем ниже 100 км преобладают

колебания с периодами 5–6 лет, а выше – с периодами 11 лет. Амплитуда 5–6-летних колебаний уменьшается с ростом высоты.

В работе [5] мы отмечали, что в области высот высвечивания эмиссии 557,7 нм проявляются как эффекты динамики и возмущений различной природы нижележащих слоев атмосферы, так и внешнее влияние солнечной активности. Это подтверждают также и приведенные выше экспериментальные сведения. В данном случае многолетние вариации I_G , как и нарушение синфазности между межгодовыми вариациями I_G и уровнем солнечной активности (индексом $F_{10,7}$) в отдельные солнечные циклы, могут быть следствием несовпадения периодов при совместном влиянии солнечной активности (~11 лет) и динамики нижележащей атмосферы (собственные периоды ~2–7 лет и, возможно, ~20–30 лет). Например, в 21-м солнечном цикле (1975–1985 гг.), когда отсутствовали существенные короткопериодические вариации в индексе ТДК, отмечались синфазность изменений I_G с уровнем солнечной активности ($F_{10,7}$) и наибольшие значения среднегодовых интенсивностей эмиссии 557,7 нм в максимуме солнечного цикла.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ поведения многолетних вариаций интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм позволяет сформулировать следующие предварительные выводы:

1. Для межгодовых вариаций интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм существует зависимость от солнечной активности; можно отметить солнечные циклы, например, 19-й и 21-й циклы, в пределах которых интенсивность эмиссии 557,7 нм меняется строго синфазно с уровнем солнечной активности (индексом $F_{10,7}$).

2. Существуют солнечные циклы (20-й, 23-й и отчасти 22-й), в пределах которых синфазность вариаций эмиссии 557,7 нм с 11-летним периодом уровней солнечной активности нарушается и в межгодовых вариациях эмиссии 557,7 нм появляются более короткие периоды (≤ 4 –6 лет).

3. Многолетние вариации эмиссии 557,7 нм, как и нарушение синфазности между межгодовыми вариациями интенсивности эмиссии 557,7 нм и уровнем солнечной активности (индексом $F_{10,7}$) в отдельные солнечные циклы, могут быть следствием совместного влияния эффектов солнечной активности (с периодами ~11 лет) и динамики нижележащей

атмосферы (с периодами ~2–7 лет и, возможно, ~20–30 лет), обладающих различными собственными частотами.

Работа выполнялась при поддержке программы Президиума РАН №16 (часть 3), гранта РФФИ 09-05-00243-а и в рамках Российско-болгарского проекта «Атмос».

1. Lord Rayleigh S.J.H. The light of the night sky: analysis of the intensity variations at three stations // Proc. Roy. Soc. London. A. 1935. V. 151. N 872. P. 22–55.
2. Fukuyama K. Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere. II. Seasonal and long-term variations // J. Atmos. and Terr. Phys. 1977. V. 39. N 1. P. 1–14.
3. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
4. Гвишвили Г.В., Леценко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Сергеев Н.П., Фишкова Л.М., Шефов Н.Н. Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1996. Т. 32. № 3. С. 329–339.
5. Mikhalev A.V., Stoeva P., Medvedeva I.V., Benev B., Medvedev A.V. Behavior of the atomic oxygen 557.7 nm atmospheric emission in the solar cycle 23 // Adv. Space Res. 2008. V. 41. N 4. P. 655–659.
6. Mikhalev A.V., Popov M.S., Kazimirovsky E.S. The manifestation of seismic activity in 557.7 nm emission variations of the Earth's upper atmosphere // Adv. Space Res. 2001. V. 27. N 6–7. P. 1105–1108.
7. 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. (B). 2000. V. 25. N 5–6. P. 541–545.
8. Fukuyama K. Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere. III. Variations during stratospheric warming events // J. Atmos. and Terr. Phys. 1977. V. 39. N 3. P. 317–331.
9. Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т., Жалковская Л.В. Динамические модели свободной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 292 с.
10. Mikhalev A.V., Medvedeva I.V., Kazimirovsky E.S., Potapov A.S. Seasonal variation of upper – atmospheric emission in the atomic oxygen 555 nm line over East Siberia // Adv. Space Res. 2003. V. 32. N 9. P. 1787–1792.
11. Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрон. 1997. Т. 37. № 2. С. 250–260.
12. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 270 с.
13. Мегрелишвили Т.Г. Закономерности вариаций рассеянного света и излучения сумеречной атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1981. 273 с.

A.V. Mikhalev, I.V. Medvedeva. Solar cycles in variations of the 557.7 nm emission.

Variation of the 557.7 nm airglow intensity (emitting layer height is 85–115 km) in the 23-rd solar cycle are analyzed. The experimental data of the 557.7 nm atomic oxygen emission obtained at ISTEP Geophysical observatory near Irkutsk (52 N, 103 E) are used. The feature of observed 557.7 nm intensity variations is an infringement of direct correlation dependence between the emission intensity and solar activity level ($F_{10,7}$) in individual years. Also, the results received in the 18th–22d solar cycles at the other mid-latitude stations are analyzed. It is revealed, that the features of the long-term variations of 557.7 nm intensity in the 23rd and 20th solar cycles are the most similar. There are some solar cycles, in which the phase synchronism of 557.7 nm emission variations with 11-years cycle of solar activity is broken. In these cycles the periods about 4–6 years in 557.7 nm emission variations are dominant. The possible reasons of interannual variations of 557.7 nm atmospheric emission are associated with the influence of lower atmosphere.