

Воздействие вариаций коротковолновой солнечной радиации на состав и динамику атмосферы по данным наблюдений и модельным расчетам

Груздев А.Н.¹, Безверхний В.А.¹, Шмидт Х.², Брассёр Г.П.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия

²Институт метеорологии им. Макса Планка, Германия

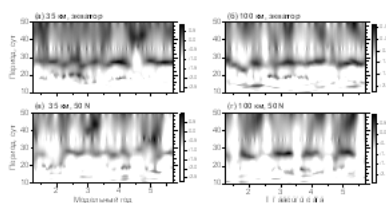
³Климатический сервисный центр, Германия

a.n.gruzdev@mail.ru, vabev@mail.ru, hauke.schmidt@zmaw.de, guy.brasseur@hzg.de

Проблема влияния вариаций уровня солнечной активности на климат Земли привлекает внимание исследователей на протяжении очень многих лет. Ключевое значение в этой проблеме имеет понимание и оценка роли динамических процессов в атмосфере, поскольку до сих пор нет достаточно удовлетворительного согласия между результатами анализа данных наблюдений и результатами моделирования влияния солнечной активности на земную атмосферу [1].

Поток коротковолновой солнечной радиации на верхней границе земной атмосферы испытывает вариации в широком диапазоне временных масштабов. Среди них – колебания с периодами около 11 лет (11-летний цикл), 2-2.5 лет (квазидвухлетний цикл) и 27 суток (27-суточный, или вращательный цикл). Амплитуда 27-суточного цикла может достигать 60% от амплитуды 11-летнего цикла, в то время как квазидвухлетние вариации потока солнечной радиации в несколько раз слабее. В докладе представлены результаты, касающиеся некоторых эффектов этих трех солнечных циклов в средней атмосфере Земли.

Влияние 27-суточного солнечного цикла на атмосферу изучалось нами с помощью химико-климатической модели HAMMONIA [2, 3]. В то время как термический и химический отклики в верхней атмосфере очень отчетливы и постоянны при неизменном форсинге, отклики в стратосфере и мезосфере имеют перемежающийся характер и очень изменчивы во времени (рис. 1). Отклики во внетропических широтах в целом зависят от сезона, и их чувствительность зимой часто больше, чем летом. Модельные результаты показывают, что важную роль в отклике стратосферы на 27-суточный солнечный цикл могут играть динамические процессы.



Важнейший компонент атмосферной циркуляции – квазидвухлетние колебания зональной скорости экваториального стратосферного ветра, оказывающие значительное влияние и на динамику атмосферы средних и полярных широт [1]. По данным измерений нами обнаружена высокая когерентность квазидвухлетних колебаний зональной скорости экваториального стратосферного ветра с аналогичными вариациями ультрафиолетовой солнечной радиации [4, 5]. Колебания скорости ветра в окрестности слоя стратосферы (~50 км) происходят в фазе с солнечными квазидвухлетними вариациями (кривая 1 на рис. 2).

Функция озонного нагревания атмосферы имеет максимум в окрестности стратоспаузы, а меридиональный градиент концентрации озона в этом слое в окрестности экватора испытывает квазидвухлетние вариации, противоположные по фазе квазидвухлетним вариациям ультрафиолетовой солнечной радиации. Вызванные этим вариации озонных притоков тепла могли бы, в соответствии с уравнением термического ветра, служить причиной синхронизации квазидвухлетних колебаний скорости ветра с солнечными вариациями [5].

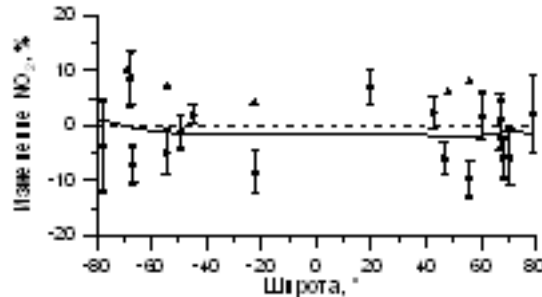


Рис. 1. Логарифм спектральной плотности отношения смеси озона в зависимости от времени на высотах 35 км и 100 км на экваторе (а, б) и на широте 50° с.ш. (в, г). Единицы спектральной плотности: $\text{млн}^{-2}\text{сут}$.

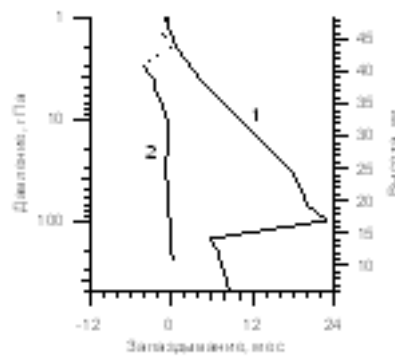


Рис. 2. Запаздывание квазидвухлетних колебаний зональной скорости экваториального ветра (1) и меридионального градиента отношения смеси озона на экваторе (2) относительно квазидвухлетних вариаций потока солнечной радиации. Штриховые участки кривых соответствуют колебаниям, сдвинутым по фазе на полпериода относительно истинных колебаний, сплошные участки – вариациям без фазового сдвига, пунктир – интерполяция между этими участками.

По данным наземных измерений нами обнаружено влияние 11-летнего цикла солнечной активности на общее содержание двуокиси азота (сосредоточена в основном в стратосфере) в средних и полярных широтах [6, 7]. Содержание NO_2 в средних широтах северного и южного полушарий уменьшается при изменении уровня солнечной активности от минимума к максимуму (рис. 3). Влияние 11-летнего солнечного цикла на стратосферное содержание NO_2 противоположно по знаку влиянию на стратосферное содержание озона (треугольники на рис. 3). Амплитуда наблюдаемых изменений содержания NO_2 многократно превышает отклик NO_2 на 11-летний солнечный цикл, оцененный в численных расчетах с двумерной моделью фотохимических, радиационных и динамических процессов SOCRATES [6] (кривая на рис. 3).

Анализ данных наблюдений и модельные расчеты показали, что 11-летний солнечный цикл оказывает существенное влияние на меридиональный перенос стратосферного озона в зимний период, особенно значительное в северном полушарии [8]. Приток озона в средние

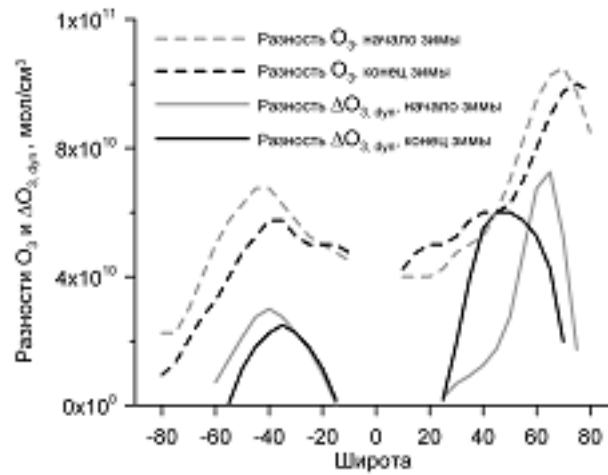


Рис. 3. Изменение содержания NO_2 в вертикальном столбе стратосферы от фазы минимума к фазе максимума солнечной активности в зависимости от широты по данным утренних измерений (кружки) и по расчетам с помощью модели SOCRATES (кривая). Вертикальные отрезки соответствуют 95%-м доверительным интервалам. Треугольниками показаны аналогичные изменения общего содержания озона.

широты возрастает при высоком уровне солнечной активности по сравнению с притоком в период минимума солнечной активности. По данным моделирования этот механизм обеспечивает до 30% зимнего увеличения содержания озона в слое озонного максимума (около 22 км) в средних широтах южного полушария в условиях максимума солнечной активности (рис. 4). В средних широтах северного полушария этот механизм вносит основной вклад в изменения содержания озона в этом слое во второй половине зимы при вариациях уровня солнечной активности.



Рис. 4. Локальная когерентность между индексом солнечной активности $F_{10.7}$ и скоростью экваториального стратосферного ветра на изобарической поверхности 15 гПа. Области положительных значений оконтурены. Значения, по модулю меньше 0.6, не показаны.

Выделена также квазидесятилетняя компонента изменчивости скорости экваториального стратосферного ветра [4]. Локальная (по времени) когерентность между скоростью ветра и уровнем солнечной активности в окрестности периода солнечного цикла принимает высокие значения для большинства солнечных циклов, за исключением короткого интервала длительностью в несколько лет, последовавшего за извержением вулкана Пинатубо в 1991 г. (рис. 5). 11-летние колебания скорости ветра на изобарической поверхности 15 гПа (~ 30 км) до 1992 г. происходили примерно в фазе (с запаздыванием около 1 года), а в период с 1997 г. по 2007 г. – примерно в противофазе с солнечным циклом.

На рис. 6 приведено вертикальное распределение фазы 11-летних вариаций скорости экваториального ветра относительно фазы 11-летнего цикла солнечной активности для временного интервала 1953-1989 гг. Отметим две особенности этого распределения. Во-первых, колебания скорости ветра выше и ниже 30 км почти противофазны (ср. сплошную и штриховую части кривой). Во-вторых, высотный ход фазы 11-летних вариаций скорости ветра примерно следует (с учетом противофазности выше и ниже 30 км) высотному ходу

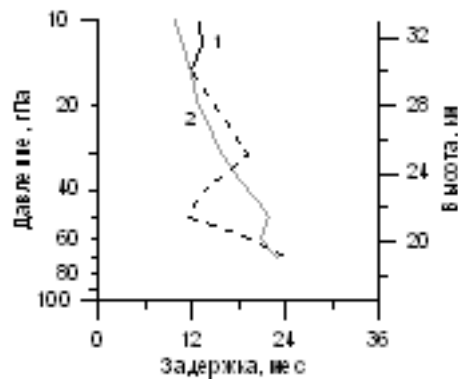


Рис. 5. Фазовая задержка вариаций зональной скорости экваториального ветра относительно вариаций индекса солнечной активности F10.7 на масштабах 11-летнего цикла (1) и квазидвухлетней цикличности (2). Штриховой участок соответствует дополнительному сдвигу фазы на половину периода солнечного цикла.

фазы квазидвухлетних колебаний скорости ветра, по крайней мере, на высотах 25-33 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 12-05-00938 и 13-05-00187), программ РАН и Немецкого научного общества (Deutsche Forschungsgemeinschaft).

Литература

1. *Gray L.J., Beer J., Geller M. et al.* Solar influence on climate // *Reviews of Geophysics*. – 2010. – V. 48. – RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
2. *Gruzdev A.N., Schmidt H., Brasseur G.P.* The effect of the solar rotational irradiance variation on the middle and upper atmosphere calculated by a three-dimensional chemistry-climate model // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2009. – V. 9. – № 2. – P. 595-614.
3. *Schmidt H., Kieser J., Misios S., Gruzdev A.N.* The atmospheric response to solar variability: Simulations with a general circulation and chemistry model for the entire atmosphere. – In F.-J. Luebken (ed.): *Climate And Weather of the Sun-Earth System (CAWSES)*. – Springer, Dordrecht, the Netherlands, 2013. – P. 585-604.
4. *Безверхний В.А., Груздев А.Н.* О связи квазидесятилетних и квазидвухлетних колебаний солнечной активности и экваториального стратосферного ветра // *Доклады Академии наук*. – 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 809-813.
5. *Груздев А.Н., Безверхний В.А.* О возможном влиянии озона на квазидвухлетнюю цикличность в экваториальной стратосфере // *Доклады АН*. – 2010. – Т. 434. – № 3. – С. 395-400.
6. *Груздев А.Н.* Широтная зависимость вариаций стратосферного содержания NO₂ // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* – 2008. – Т. 44. – № 3. – С. 345-359.
7. *Gruzdev A.N.* Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂ // *International Journal of Remote Sensing* – 2009. – V. 30. – No. 15. – P. 4227-4246.
8. *Груздев А.Н., Брассёр Г.П.* Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на характеристики годового хода общего содержания озона // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2007. – Т. 43. – № 3. – С. 379-391.

Effect of variations in short wave solar radiation on atmosphere composition and dynamics according to observations and modeling

Gruzdev A.N.¹, Bezverkhny V.A.¹, Schmidt H.², Brasseur G.P.³

¹ *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russia*

² *Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany*

³ *Climate Service Center, Hamburg, Germany*

Short wave solar radiation flux at the top of the Earth's atmosphere undergoes variations within a broad range of time scales. Among them are the oscillations with periods of about 11 years (11-year cycle), 2-2.5 years (quasi-biennial cycle), and 27 days (27-day or rotational cycle). The amplitude of the 27-day cycle may approach 60% of the amplitude of the 11-year cycle, while the quasi-biennial variations of the solar radiation flux are several times weaker. In this report, we present the results, concerning some effects of the three solar cycles on the Earth's middle atmosphere.

The effect of the 27-day solar cycle on the atmosphere was studied by the HAMMONIA chemistry climate model. While the thermal and chemical responses are very distinct and permanent in the upper atmosphere under a constant forcing, the responses in the stratosphere and mesosphere have intermittent character and vary considerably in time. In the extratropics the responses are, in general, seasonally dependent with frequently stronger sensitivities in winter than in summer. The model results show, that dynamical processes may play an important role in the stratospheric response to the 27-day solar cycle.

The most important component of the atmospheric circulation is the quasi-biennial oscillations in zonal velocity of equatorial stratospheric wind, which affect considerably the dynamics of the atmosphere in the middle and polar latitudes. We found a high coherence of quasi-biennial oscillations in stratospheric wind velocity with similar variations in short wave solar radiation. The oscillations in wind velocity near the stratopause layer are in phase with the quasi-biennial solar variations. We show, that the meridional gradient of ozone concentration in this layer undergoes quasi-biennial variations which, according to the thermal wind equation, could bring about the synchronization of quasi-biennial oscillations in the wind velocity with solar variations.

Using the measurement data, we found the effect of the 11-year cycle in solar activity on stratospheric nitrogen dioxide in the middle and polar latitudes. It is opposite in sign to the effect of the 11-year cycle on stratospheric ozone. Analysis of observational data and model calculations show, that the 11-year solar cycle affect significantly the meridional transport of stratospheric ozone in winter time, especially in the northern hemisphere. We also found an 11-year cycle in the velocity of the equatorial stratospheric wind. The vertical profile of the phase of the 11-year oscillations in wind velocity is similar to the profile of the phase of quasi-biennial oscillations. Additionally, we revealed an 11-year modulation of the period and amplitude of quasi-biennial oscillations in wind velocity themselves.