

УДК 551.51

# Связь широтной динамики влагосодержания атмосферы с квазидвухлетними колебаниями зонального ветра в экваториальной стратосфере и солнечной активностью над северо-востоком Евразии за период 1979–2015 гг.

М.С. Васильев, С.В. Николашкин\*

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН  
677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31*

Поступила в редакцию 6.02.2017 г.

Проведен анализ связи широтной динамики влагосодержания атмосферы ( $W$ ) с квазидвухлетними колебаниями (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере и солнечной активностью над северо-востоком Евразии за период 1979–2015 гг. Используются данные солнечных фотометров сети AERONET (ст. Якутск, ст. Томск, ст. Иркутск и ст. Даланзадгад) и ERA-Interim реанализа, который основан на регулярных метеорологических наблюдениях, аэрологической и спутниковой информации. Обнаружена достоверно значимая корреляционная связь среднегодовых значений  $W$  и КДК при его восточной фазе. В то же время в вариациях  $W$  в зависимости от географической широты наблюдается проявление фундаментальных циклов солнечной активности (Швабе, Хейла и Брюкнера).

*Ключевые слова:* влагосодержание атмосферы, солнечный фотометр, солнечная активность, квазидвухлетние колебания, тропосфера, стратосфера, реанализ; moisture content of the atmosphere, sun-sky photometer, solar activity, quasi-biennial oscillation, troposphere, stratosphere, reanalysis.

## Введение

Известно, что квазидвухлетние колебания (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере — это проявления высокочастотной квазирегулярной изменчивости атмосферы и климата Земли на межгодовых масштабах. КДК впервые были обнаружены в смене направлений двух систем зональных ветров — восточного (Кракатау) и западного (Берсона). Изменения направления ветра с запада на восток и наоборот наблюдались с периодом около 26 мес [1]. Достаточно полные обзоры открытия КДК представлены в работах [2–4]. КДК обнаруживаются в изменениях различных климатических переменных [1, 5–8], несмотря на то что механизмы их формирования еще окончательно не выяснены. Например, в работах [9–11] показано наличие КДК и 4–5-летних колебаний в межгодовой изменчивости радиотеплового поля Земли в тропосфере над Атлантическим и Тихим океанами (на частотах, содержащих информацию о влаго- и водозапасе тропосферы) по данным микроволнового спутникового мониторинга. В обзоре [12] описаны механизмы формирования КДК и их связи с меридиональной циркуляцией атмосферы, конвективными процессами в тропиках, актив-

ностью тропического циклогенеза, а также представлены данные наблюдений (как правило, наземных локальных (точечных) измерений) различных характеристик атмосферы.

Таким образом, ряд исследований указывает на проявления КДК в различных атмосферных параметрах [5–11].

В настоящее время не вызывает сомнений факт существования циклической изменчивости климата, связанной с солнечной активностью (СА). Известны проявления 11- и 22-летней цикличности СА, которые, воздействуя на нижние слои земной атмосферы, приводят к изменениям земного климата не только на региональном уровне, но и в планетарном масштабе [13]. Наблюдаются также 33- и 80–90-летняя цикличности климатических показателей [14]. Исследования, связанные с влиянием СА на погоду и климат, имеют длительную историю, однако до сих пор нет однозначного ответа на вопрос о реальном и значимом (количественном) вкладе СА в климатические изменения. На основе комплексного анализа данных наблюдений гидрометеорологических характеристик тропосферы и океана получены новые доказательства воздействия СА на климатические процессы [15–18].

В настоящей работе проведен анализ связи широтной динамики влагосодержания атмосферы с КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере и СА над северо-востоком Евразии за период 1979–2015 гг.

\* Михаил Семенович Васильев (m.s.vasiliev@ikfia.ysn.ru); Семен Викторович Николашкин (nikolashkin@ikfia.ysn.ru).

## Материалы исследования

В работе использованы данные уровня 2 солнечных фотометров сети AERONET (AErosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) [19, 20] по среднемесячным значениям влагосодержания атмосферы ( $W$ , г/см<sup>2</sup> – масса водяного пара, содержащаяся в столбе атмосферы (от заданного уровня до верхней границы) единичного сечения). Преимущество данной сети – это использование однотипных автоматических фотометров и стандартизированные процедуры калибровки и обработки данных. Из сети AERONET отобраны локальные станции, измеряющие влагосодержание атмосферы, находящиеся в различных широтных зонах над северо-востоком Евразии: ст. Якутск (61° с.ш., 129° в.д.), ст. Томск (56° с.ш., 85° в.д.), ст. Иркутск (51° с.ш., 103° в.д.) и ст. Даланзадгад (43° с.ш., 104° в.д., южная часть Монголии). Самый длительный ряд наблюдений  $W$  (с марта 1997 г.) получен на ст. Даланзадгад; менее длительный ряд – на ст. Якутск (с мая 2004 г.).

Для выявления квазипериодических флуктуаций на протяжении длительного времени наблюдения  $W$  привлечены данные реанализа ERA-Interim за период 1979–2015 гг. [21]. ERA-Interim использует модель ECMWF CY29R1 с 6-часовым шагом по времени, горизонтальным разрешением 50 км и вертикальным разрешением 60 слоев. Были использованы «ячейки», содержащие среднемесячные значения  $W$ , с широтно-долготным разрешением  $0,125 \times 0,125^\circ$  вокруг локальных станций наблюдения.

В качестве индекса СА использовались средне-годовые значения чисел Вольфа из данных Научно-исследовательского отдела солнечной физики Королевской обсерватории Бельгии (Royal Observatory of Belgium, <http://www.astro.oma.be/en/>).

Информация о средних значениях (вост. фаза – положительные значения, зап. фаза – отрицательные) индекса КДК на уровне 30 Мб получена по данным NOAA/ESRL PSD (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/qbo.data>).

## Результаты исследования и их обсуждение

На первоначальном этапе исследования было проведено сопоставление данных ERA-Interim и локальных станций наблюдения  $W$  для дальнейшего использования реанализа, так как он охватывает более длительный период наблюдения. Данные реанализа достаточно хорошо отображают сезонную изменчивость  $W$ . Значения  $W$  между реанализом и локальными станциями наблюдения находятся в пределах среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения ( $S_x$ ) результатов измерений, полученных солнечными фотометрами. Максимальное расхождение между данными наблюдается в летний период, например над ст. Якутск (рис. 1). Однако коэффициент корреляции Пирсона  $R$  (уровень значимости  $P = 99\%$  при критическом значении  $r_{\text{крит}} = 0,71$ ) между данными ERA-Interim и ст. Якутск

в сезонном ходе  $W$  за период 2004–2015 гг. составил 0,99.

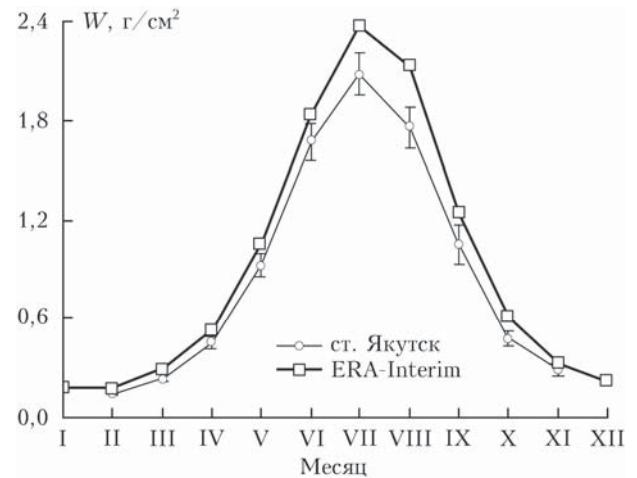


Рис. 1. Сезонный ход  $W$  по данным ст. Якутск и ERA-Interim реанализа за период 2004–2015 гг.

Известно, что КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере влияют на распространение внетропических планетарных волн и среднюю меридиональную циркуляцию атмосферы [22, 23]. Эффекты КДК наблюдаются не только вблизи экватора, но и во внеэкваториальной области в изменениях различных атмосферных параметров [24]. Например, в работе [25] было установлено, что при восточной фазе КДК во внетропических широтах преобладает меридиональная циркуляция атмосферы, а при западной фазе – зональная. В периоды преобладания меридиональной циркуляции усиливается междуширотный воздухообмен, приводящий к усилению циклогенеза, в Арктике и субтропической зоне. Восточные ветры в экваториальной стратосфере при этом становятся более устойчивыми.

С помощью метода спектрального анализа Фурье рассмотрены среднегодовые значения  $W$  с целью выявления циклической природы (КДК либо иные квазирегулярные колебания). На рис. 2 представлен спектральный анализ среднегодовых значений  $W$  за период 1979–2015 гг. по данным ERA-Interim над локальными станциями наблюдения. Видно, что вне зависимости от географической широты в среднегодовых вариациях  $W$  наблюдаются максимальные всплески («пики») на частотах, соответствующие диапазонам от 2 до 2,7 и от 3 до 4 лет. В свою очередь, диапазон колебания  $W$  от 2 до 2,7 лет подобен и, возможно, напрямую связан с КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере.

В связи с этим предположением было проведено сопоставление среднегодовых значений  $W$  со значениями индекса КДК при восточной и западной фазах. Обнаружена достоверно значимая корреляционная связь ( $P = 99\%$ ,  $r_{\text{крит}} = 0,42$ ) среднегодовых значений  $W$  и КДК при восточной фазе над локальными станциями наблюдения. Коэффициенты корреляции  $R$  между  $W$  и КДК восточной фазы положительны и составляют 0,77 для ст. Якутск, 0,81

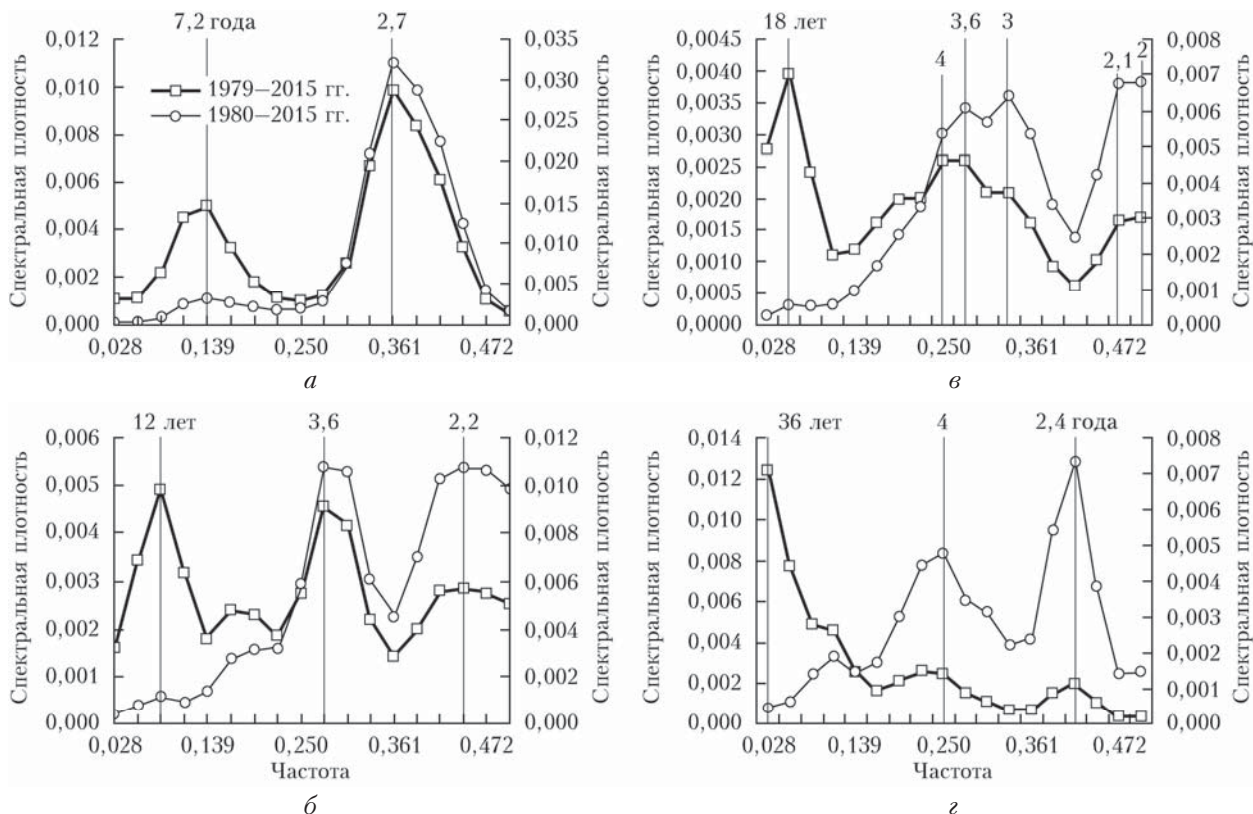


Рис. 2. Спектральный анализ среднегодовых значений  $W$  (ERA-Interim) за период 1979–2015 гг. (с учетом трендовой компоненты – левая ось ординат) и 1980–2015 гг. (без трендовой компоненты – правая ось ординат) над ст. Якутск (а), ст. Томск (б), ст. Иркутск (в) и ст. Даланзадгад (г). По оси абсцисс отложена частота, соответствующая определенным периодам (годам). Вертикальными линиями отмечены максимальные всплески («пики») квазирегулярных колебаний

для ст. Томск, 0,79 для ст. Иркутск и 0,78 для ст. Даланзадгад. При западной фазе КДК коэффициенты корреляции отрицательны и составляют  $-0,78$  для ст. Якутск,  $-0,82$  для ст. Томск,  $-0,8$  для ст. Иркутск и  $-0,79$  для ст. Даланзадгад.

Кроме того, на рис. 2 также видны «пики» на частотах, соответствующих периодам 7,2 (ст. Якутск), 12 (ст. Томск), 18 (ст. Иркутск) и 36 лет (ст. Даланзадгад). Периоды  $W$ , составляющие 12, 18 и 36 лет, соответствуют (близки) фундаментальным циклам СА: 11-летнему циклу СА Швабе (Schwabe), циклу Хейла (Hale), равному удвоенному циклу Швабе, и циклу Брюкнера (Bruckner) продолжительностью около 35 лет (цикл выражает многолетние колебания климата от холодных и влажных лет к теплым и сухим и может длиться от 20 до 50 лет). Период  $W$ , равный 7,2 года, над ст. Якутск соответствует (может быть связан) квазипериодичным (в среднем около 8 лет) вариациям магнитных полей солнечных пятен, с положительными экстремумами среднегодовых значений, чаще всего попадающими на фазы роста и спада 11-летних циклов СА [26]. В работе [18] показаны КДК приземной температуры воздуха (данные метеостанции Якутск) с периодами 2,5 и 5,8 лет, положительные экстремумы которых также приходятся на фазы роста и спада на протяжении 20–23-го циклов СА.

Следующее обстоятельство – это присутствие хорошо видимых трендовых компонент над ст. Томск

и ст. Иркутск с максимумами (гребнями)  $W$  в эпоху нечетных (21, 23) и минимумами (ложбинами) в эпоху четных циклов СА (22, 24). Мы получили эти трендовые компоненты, аппроксимировав их полиномом 5-го порядка (рис. 3). Максимум  $W$  над ст. Даланзадгад за исследуемый период наблюдается в эпоху минимума между четным 22-м и нечетным 23-м циклами СА.



Рис. 3. Среднегодовые значения  $W$  (ERA-Interim) над локальной станцией наблюдения Томск и чисел Вольфа за период 1979–2015 гг.

По данным реанализа построены пространственно-временные карты распределения  $W$  над северо-востоком Евразии за рассматриваемый период 1979–2015 гг. с широтно-долготным разрешением  $1^\circ$  (в работе карты не приводятся).

### Заключение

Таким образом, проведенное исследование показывает, что наблюдается широтная связь влагосодержания атмосферы  $W$  с КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере и СА. Обнаружена достоверно значимая корреляционная связь среднегодовых значений  $W$  и КДК при восточной фазе зонального ветра в экваториальной стратосфере над локальными станциями наблюдения. В то же время в вариациях  $W$  в зависимости от географической широты наблюдается проявление фундаментальных циклов СА (Швабе, Хейла и Брюкнера). Представляет интерес дальнейшее исследование связи широтной динамики  $W$  с КДК и СА над другими регионами Евразийского материка при расширении диапазона используемых данных.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-05320а.

1. Reed R.J., Campbell W.J., Rasmussen L.A., Rogers D.G. Evidence of a downward-propagating, annual wind reversal in the equatorial stratosphere // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66, iss. 3. P. 813–818.
2. Maruyama T. The quasi-biennial oscillation (QBO) and equatorial waves – a historical review // *Meteorol. Geophys.* 1997. V. 48, N 1. P. 1–17.
3. Hamilton K. Observations of tropical stratospheric winds before World War II // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79, N 7. P. 1367–1371.
4. Labitzke K., van Loon H. The stratosphere. N.Y.: Springer, 1999. 179 p.
5. Angell J.K., Korshover J. Biennial variation in springtime temperature and total ozone in extratropical latitude // *Mon. Weather Rev.* 1967. V. 95, N 11. P. 757–762.
6. Рязанова А.А. О проявлениях квазидвухлетней цикличности в стратосферных процессах высоких и средних широт // *Тр. ЦАО.* 1967. Вып. 76. С. 100–106.
7. Naujokat B. An update of the observed quasi-biennial oscillation of stratospheric winds over the tropic // *J. Atmos. Sci.* 1986. V. 43, N 17. P. 1873–1877.
8. Kiss P., Muller R., Janosi I.M. Long-range correlations of extrapolar total ozone are determined by the global atmospheric circulation // *Nonlin. Processes Geophys.* 2007. V. 14, N 4. P. 435–442.
9. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Комарова Н.Ю. Региональная неоднородность климатических изменений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* Т. 2, вып. 5. М.: «Азбука-2000», 2008. С. 410–418.
10. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания в структуре радиотеплового поля над Атлантическим океаном по данным микроволнового спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2010. Т. 7, № 3. С. 53–61.
11. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания радиотеплового поля тропической зоны Атлантики // *Исследования Земли из космоса.* 2011. № 4. С. 78–84.
12. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования. Препр. / Институт космических исследований РАН (Москва). 2011. № 2163. 60 с.
13. Пудовкин М.И., Люблич А.А. Проявление циклов солнечной и магнитной активности в вариациях температуры воздуха в Ленинграде // *Геоматнегизм и аэрон.* 1989. Т. 29, № 3. С. 359–363.
14. Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 351 с.
15. Gray L.J., Beer J., Geller M., Haigh J.D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G.A., Shindell D., van Geel B., White W. Solar influence on climate // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. P. RG4001. DOI: 10.1029/2009RG000282.
16. De Jager C., Duhau S. The variable solar dynamo and the forecast of solar activity: Influence on terrestrial surface temperature // *Global Warming in the 21st Century* / Ed. by Julliann M. Cossia. Hauppauge. Nova Science, 2011. DOI: 978-1-61728-980-4.
17. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле».* 2011. Т. 4, № 1. С. 87–108.
18. Vasiliev M.S., Nikolashkin S.V. Influence of solar activity on surface air temperature variations and quasi-biennial oscillations in Yakutia // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 92925H. DOI: 10.1117/12.2074603.
19. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – a federation instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
20. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky-radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, iss. 8. P. 9791–9806.
21. ECMWF Newsletter N 110 – Winter 2006/07 / Ed. by B. Riddaway. European Center for Medium Range Weather Forecast, 2007. P. 53.
22. Landsberg H.E. Biennial pulses in the atmosphere // *Beit. Phys. Atmos.* 1962. V. 35, N 3/4. P. 184–194.
23. Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kimmersley J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M. The quasi-biennial oscillation // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39, N 2. P. 179–229.
24. Sitnov S.A. QBO effect manifesting in ozone, temperature, and wind profiles // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22, N 5. P. 1495–1512.
25. Погосян Х.П., Павловская А.А. Аномалии атмосферной циркуляции приземного давления и температуры в связи с квазидвухлетней цикличностью. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 78 с.
26. Милецкий Е.В., Наговицын Ю.А. Временные вариации среднегодовых значений напряженности магнитных полей солнечных пятен // *Солнце в эпоху смены знака магнитного поля.* 2001. С. 281–283.

*M.S. Vasiliev, S.V. Nikolashkin.* **Correlations of latitudinal dynamics of atmospheric moisture content with quasi-biennial oscillations of zonal wind in the equatorial stratosphere and solar activity over the north-east of Eurasia during 1979–2015.**

Correlations of latitudinal dynamics of the atmospheric moisture content ( $W$ ) with quasi-biennial oscillations (QBO) of zonal wind in the equatorial stratosphere and solar activity over the north-east of Eurasia during 1979–2015 are analyzed with the use of data of AERONET sun-sky photometers (st. Yakutsk, st. Tomsk, st. Irkutsk, and st. Dalanzadgad) and ERA-Interim reanalysis, based on the regular meteorological observations, aerological and satellite information. Reliably significant correlation is found between the mean annual values of  $W$  and QBO during its eastern phase. At the same time, variations in  $W$ , depending on latitude, reveal the fundamental cycles of solar activity (Schwabe, Hale, and Bruckner).