

УДК 551.513 + 551.583

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЩУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ АТМОСФЕРЫ

© 2019 г. М. Б. Богданов\*, С. В. Морозова

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского*

*410012, Саратов, Астраханская ул., 83*

*\*E-mail: BogdanovMB@info.sgu.ru*

Поступила в редакцию 10.12.2018 г.

Принята к печати 29.05.2019 г.

Изучены возможные связи среднемесячных значений модуля момента импульса ветров с аномалией глобально осредненной приповерхностной температуры и изменением радиационного воздействия. Показано существование между этими характеристиками статистически значимой положительной линейной корреляции. Полученные результаты находятся в соответствии с выводами теории подобия планетных атмосфер.

**Ключевые слова:** атмосфера, момент импульса, глобальная температура, радиационное воздействие.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-35155559-12>

### ВВЕДЕНИЕ

Общая циркуляция атмосферы, возникающая под действием неравномерного распределения инсоляции по поверхности и вращения Земли, является одним из основных климатообразующих факторов [1, 2]. В свою очередь, характер циркуляции зависит от другого важнейшего климатического фактора — радиационного воздействия. Изменение величины данного воздействия, связанное с увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов или вариацией потока прямой солнечной радиации, должно отражаться на глобальной температуре и динамике атмосферы.

В настоящее время основным подходом к изучению связи характеристик атмосферной циркуляции с глобальными изменениями климата является расчет моделей общей циркуляции атмосферы и океана [3]. Несмотря на многие проблемы, возникающие при решении этой задачи [4], результаты осреднения по ансамблю независимых моделей представляются достаточно надежными и позволяют описать наблюдаемые изменения, а также спрогнозировать будущую динамику атмосферы нашей планеты [3].

Независимым подходом к изучению отклика характеристик циркуляции на глобальные изменения климата является использование раз-

работанной Г.С. Голицыным теории подобия планетных атмосфер [5]. Она основана на соображениях размерности, но, несмотря на свою простоту, позволяет получить интересные результаты при исследовании атмосфер планет Солнечной системы и даже экзопланет.

Целью настоящей работы является изучение возможных связей одной из основных характеристик общей циркуляции атмосферы — среднего момента импульса ветров с аномалией глобально осредненной приповерхностной температуры и изменением радиационного воздействия, а также сравнение результатов с выводами теории подобия планетных атмосфер.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Нами были использованы глобально осредненные значения составляющих момента импульса ветров, полученные по данным реанализа. Система координат и методика расчета момента описана в работе [8], в которой приведены также ссылки на другие источники. Данные с временным разрешением 6 ч доступны по сети Интернет (<http://files.aer.com/aerweb/AAM/>). На основе этой информации нами были рассчитаны 828 среднемесячных значений модуля момента импульса  $h$  (в единицах  $10^{26}$  кг · м<sup>2</sup>/с) с января 1948 г. по декабрь 2016 г.

Для среднемесячных значений аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры (в  $K$ ) за тот же интервал времени был взят ряд NOAA GST (версия 4.0) [9, 10] с сервера сети Интернет ([ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaaglobaltemp/operational/timeseries/aravg.mon.land\\_ocean.90S.90N.v4.0.1.201806.asc/](ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaaglobaltemp/operational/timeseries/aravg.mon.land_ocean.90S.90N.v4.0.1.201806.asc/)).

Среднемесячные значения радиационного воздействия (в единицах  $Вт/м^2$ ) рассчитываются как

$$F_S = \frac{(1-A)S_0}{4d^2},$$

где  $A$  — среднее планетарное альbedo Земли, принятое равным 0.30,  $S_0$  — среднемесячное значение солнечной постоянной, а  $d$  — расстояние от Земли до Солнца на середину рассматриваемого месяца, измеренное в астрономических единицах. Для солнечной постоянной использовался композитный ряд PMOD TSI среднесуточных значений, измеренных в новой шкале эксперимента VIRGO [11] ([ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/composite\\_42\\_65\\_1805.dat/](ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/composite_42_65_1805.dat/)). Первый отсчет солнечной постоянной имеет дату 17 ноября 1978 г. Отдельные отсутствующие значения ряда были заполнены нами с применением линейной интерполяции, после чего проводился расчет среднемесячных значений. Для вычисления расстояний  $d$  применялся разработанный Лабораторией реактивного движения (JPL NASA) генератор эфемерид HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/>) [12].

### ОТКЛИКИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ПРЕДСКАЗЫВАЕМЫЕ ТЕОРИЕЙ ПОДОБИЯ

Рассмотрим основы теории подобия планетных атмосфер, следуя монографии [2]. Считается, что свойства атмосферы определяются следующими характеристиками:  $F_S$  — радиационное воздействие (средний поток солнечной радиации, приходящей на единицу поверхности);  $M$  — масса атмосферного столба, имеющего единичную площадь поперечного сечения;  $C_p$  — теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $a$  — радиус планеты;  $\Omega$  — модуль средней угловой скорости вращения атмосферы;  $g$  — ускорение свободного падения. Согласно теории размерности из этих шести характеристик можно составить три безразмерных комплекса [6, 7]. Наибольший интерес представляет безразмерный комплекс, имеющий значение

порядка единицы, который с использованием обозначения постоянной Стефана — Больцмана  $\sigma_B$  может быть записан в виде:

$$\Pi_\Omega = C_p^{-1/2} \sigma_B^{1/8} F_S^{-1/8} \Omega a.$$

Согласно [2] для Земли  $\Pi_\Omega = 0.92$ . Введя в рассмотрение отношение теплоемкостей  $\gamma = C_p/C_v$  и скорость звука  $c_s = (\gamma RT)^{1/2}$ , где  $R$  — газовая постоянная для воздуха, а  $T$  — температура, определяемая из условия  $F_S = \sigma_B T^4$ , можно показать, что этот безразмерный комплекс оказывается пропорциональным ротационному числу Маха:

$$\Pi_\Omega = (\gamma - 1)^{1/2} \Omega a c_s^{-1}.$$

Таким образом, на основании теории подобия планетных атмосфер можно ожидать, что с ростом средней температуры или радиационного воздействия угловая скорость вращения атмосферы должна возрастать, причем  $\Omega \propto T^{1/2}$  и  $\Omega \propto F_S^{1/8}$ .

Одной из основных характеристик общей циркуляции атмосферы является средний момент импульса ее вращения относительно поверхности Земли — момент импульса ветров. Предполагая неизменность тензора инерции атмосферы можно считать, что модуль этого момента импульса  $h$  будет пропорционален средней угловой скорости  $\Omega$ , а следовательно  $h \propto T^{1/2}$  и  $h \propto F_S^{1/8}$ .

Наблюдаемые изменения  $T$  и  $F_S$  достаточно малы и, также как и оценки  $h$ , имеют заметные погрешности измерения. Тем не менее, можно ожидать, что взаимосвязи этих величин удастся выявить в ходе статистического анализа. С учетом малости изменений  $T$  и  $F_S$  теория подобия планетных атмосфер предсказывает наличие положительной линейной корреляции модуля момента импульса ветров с аномалией глобально осредненной температуры и изменением радиационного воздействия.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве первого этапа анализа данных были построены корреляционные диаграммы, показанные на рис. 1 и 2. Как видно из этих рисунков разброс точек на диаграммах достаточно велик. Очевидно, что он вызван не только погрешностью оценок значений соответствующих величин. Для земной климатической системы характерно наличие собственных колебаний, приводящих к изменениям глобально осреднен-

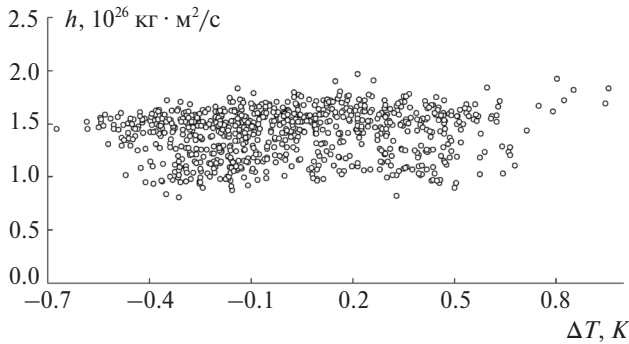


Рис. 1. Корреляционная диаграмма для среднемесячных значений аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры  $\Delta T$  и модуля момента импульса ветров  $h$ .

ной температуры. Пример такого колебания — явление Эль-Ниньо.

На величину солнечной постоянной влияет соотношение чисел фотосферных пятен и факелов. Однако более важным фактором, влияющим на изменение радиационного воздействия, является флуктуация альбеда. По данным [13] среднемесячные значения планетарного альбеда Земли изменяются от 0.285 до 0.330. Очевидно, что при использовании нами среднего значения  $A$  флуктуации альбеда вызывают погрешность рассчитанных значений  $F_S$ . Однако эти флуктуации имеют случайный характер и их влияние можно минимизировать при анализе выборки достаточно большого объема.

На среднемесячные значения  $F_S$  заметное влияние оказывает также движение нашей планеты по эллиптической орбите. При этом, как видно на рис. 2, в результате изменения расстояния  $d$  точки на корреляционной диаграмме группируются в скопления, число которых равно числу месяцев в году.

Нами были оценены выборочные коэффициенты линейной корреляции  $r$  среднемесячных значений аномалии глобальной температуры  $\Delta T$  и радиационного воздействия  $F_S$  со значениями модуля момента импульса  $h$ . Для среднеквадратичной погрешности этих коэффициентов  $\Delta r$  обычно используется выражение

$$\Delta r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}},$$

где  $n$  — объем выборки. Это выражение справедливо только в случае нормальных распределений случайных величин, малых значений  $r$  и большого объема выборки  $n$ . Оценка коэффициента корреляции для аномалий температуры и модуля момента импульса оказывается равной  $0.122 \pm 0.034$ , а корреляция радиационного воз-

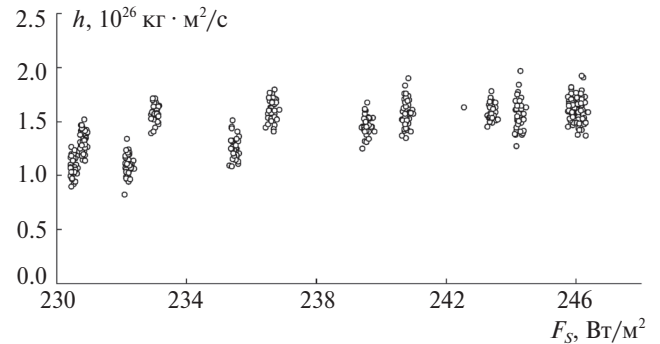


Рис. 2. Корреляционная диаграмма для среднемесячных значений радиационного воздействия  $F_S$  и модуля момента импульса ветров  $h$ .

действия с  $h$  характеризуется величиной коэффициента  $0.666 \pm 0.026$ .

Для проверки гипотезы о равенстве нулю коэффициента корреляции часто используется величина

$$\frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} = t_{n-2},$$

которая имеет распределение Стьюдента с числом степеней свободы  $n-2$ . Для принятого уровня значимости  $\alpha$  и объема выборки  $n$  может быть найдено критическое значение  $t_c$ . При выполнении условия  $|t_{n-2}| > t_c$  гипотеза о равенстве нулю коэффициента  $r$  отвергается с вероятностью  $P = 1 - \alpha$ .

В случае корреляции аномалий температуры с модулем момента импульса для  $\alpha = 0.01$  и  $n = 828$  критическое значение  $t_c = 2.58$  в то время как  $t_{n-2} = 3.55$ . В случае корреляции радиационного воздействия с  $h$  для  $\alpha = 0.01$  и  $n = 458$  имеем  $t_c = 2.59$  и  $t_{n-2} = 19.1$ . Таким образом, в обоих случаях гипотеза о равенстве нулю выборочного коэффициента линейной корреляции отвергается с вероятностью 0.99.

Знаки полученных коэффициентов корреляции имеют достаточно простое физическое объяснение. Рост радиационного воздействия  $F_S$  должен вызывать увеличение аномалии  $\Delta T$ . Это увеличение, по-видимому, сопровождается ростом разности температур приэкваториальных и полярных областей, что приводит к увеличению интенсивности атмосферной циркуляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное изучение возможных связей одной из основных характеристик общей циркуляции атмосферы — среднего момента импульса

ветров  $h$  с аномалией глобально осредненной приповерхностной температуры  $\Delta T$  и изменением радиационного воздействия  $F_S$  показывает, что в соответствии с выводами теории подобия планетных атмосфер между этими величинами наблюдается положительная корреляция. Коэффициент корреляции для среднемесячных значений  $h$  и  $\Delta T$  оказывается равным  $0.122 \pm 0.034$ , а для аналогичных значений  $h$  и  $F_S$  равным  $0.666 \pm 0.026$ . В обоих случаях гипотеза о равенстве нулю выборочного коэффициента линейной корреляции отвергается с вероятностью 0.99.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В.* Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2013. 224 с.
2. *Satoh M.* Atmospheric circulation dynamics and general circulation models. Berlin: Springer, 2014. 730 p.
3. *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., et al.* // Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 1552 p.
4. *Дымников В.П., Лыков В.Н., Володин Е.М.* Моделирование климата и его изменений: современные проблемы // Вестник РАН. 2012. Т. 82. № 3. С. 227–336.
5. *Golitsyn G.S.* A similarity approach to the general circulation of planetary atmospheres // *Icarus*. 1970. V. 13. P. 1–24.
6. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
7. *Дибай Э.А., Каплан С.А.* Размерности и подобие астрофизических величин. М.: Наука, 1976. 400 с.
8. *Zhou Y.H., Salstein D.A., Chen J.L.* Revised atmospheric excitation function series related to Earth variable rotation under consideration of surface topography // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D12108, doi: 10.1029/2005JD006608
9. *Zhang H.-M., Huang B., Lawrimore J., Menne M., Smith T.M.* NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 4.0. NOAA National Centers for Environmental Information, doi: 10.7289/V5FN144H
10. *Vose R.S., Arndt D., Banzon V.F., et al.* NOAA's merged land-ocean surface temperature analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. V. 93. P. 1677–1685. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00241.1
11. *Fröhlich C.* Total solar irradiance: what have we learned from the last three cycles and the recent minimum? // *Space Science Rev.* 2013. V. 176. P. 237–252.
12. *Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., et al.* JPL's on-line Solar System data service // *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1996. V. 28. P. 1158.
13. *Vardavas I.M., Taylor F.W.* Radiation and climate. Oxford: Oxford University Press, 2007. 492 p.

## Effect of Changes in Global Temperature and Radiative Forcing on General Atmospheric Circulation

**M. B. Bogdanov\*, S. V. Morozova**

*Saratov State University  
Astrakhanskaya Str., 83, Saratov, 410012, Russia  
e-mail: \*BogdanovMB@info.sgu.ru*

Received: 10.12.2018

Accepted: 29.05.2019

Possible connections are studied between the monthly average values of the wind angular moment module and anomaly of the globally averaged surface temperature and change in radiative forcing. The existence of statistically significant positive linear correlation between these characteristics is shown. The results obtained are in accordance with the conclusions of the theory of similarity of planetary atmospheres.

**Keywords:** atmosphere, angular moment, global temperature, radiative forcing.