

## ГЛОБАЛЬНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВОЛНЫ ПО ДАННЫМ СОВРЕМЕННЫХ РЕАНАЛИЗОВ И РАДИОЗАТМЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА COSMIC / FORMOSAT-3

*А.С. Зарубин<sup>1</sup>, Н.В. Ширшов<sup>2</sup>, А.И. Погорельцев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, a-zarubin@mail.ru

<sup>2</sup> ФГУП «ЦЭНКИ», Москва

Представлена методика обработки данных о температуре, полученных в эксперименте COSMIC. Выполнено сравнение результатов, полученных на основе данных зондирования COSMIC и реанализов ERA5 и MERRA-2, для амплитуд бегущих на запад волн с зональными волновыми числами  $m = 1$  и  $m = 2$ , а также для суточного и полусуточного приливов. Показана возможность исследования планетарных волн и атмосферных приливов с учетом их внутрисезонной изменчивости.

*Ключевые слова:* радиозатменные наблюдения, планетарные волны, атмосферные приливы.

## GLOBAL ATMOSPHERIC WAVES ACCORDING TO THE MODERN REANALYSES AND RADIO-OCCULTATION EXPERIMENT COSMIC / FORMOSAT-3 DATA

*A.S. Zarubin<sup>1</sup>, N.V. Shirshov<sup>2</sup>, A.I. Pogoreltsev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> FSUE «TsENKI», Moscow, Russia

The technique to process the temperature data obtained in the COSMIC experiment is presented. The results obtained on the basis of COSMIC sounding data and reanalyses of ERA5 and MERRA-2 have been compared for the amplitudes of waves traveling westward with zonal wave numbers 1 and 2, as well as for diurnal and semidiurnal tides. The possibility of studying planetary waves and atmospheric tides considering their variability has been shown.

*Keywords:* radio occultation measurements, planetary waves, atmospheric tides.

---

**For citation:** Zarubin A.S., Shirshov N.V., Pogoreltsev A.I. Global Atmospheric Waves According to the Modern Reanalyses and Radio-Occultation Experiment Cosmic / Formosat-3 Data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 58: 20—30. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-20-30

---

### Введение

Изучение волновых процессов разных временных и пространственных масштабов является одной из важнейших задач физики атмосферы. Интерес к данной теме вызван, прежде всего, тем, что при распространении из нижних слоев в верхние волны переносят энергию и импульс, осуществляя тем самым взаимодействие между атмосферными слоями и воздействуя на тепловой режим и циркуляцию

средней и верхней атмосферы. Кроме того, достигая высот верхней атмосферы, волны создают возмущения ионосферных параметров, учет которых необходим при прогнозировании космической погоды и для повышения надежности работы систем спутниковой навигации и радиолокации. Медленные планетарные волны не распространяются в термосферу, но способны оказывать влияние на верхнюю атмосферу, модулируя более быстрые гравитационные волны и атмосферные приливы. Таким образом, исследование глобальных волн в средней атмосфере, выступающей передающим звеном между нижней и верхней атмосферой, представляется актуальным.

В качестве источника информации о глобальном распределении метеорологических полей были выбраны данные эксперимента по радиозатменному зондированию атмосферы COSMIC/FORMOSAT-3 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate, в дальнейшем COSMIC) [1]. COSMIC — совместный проект США и Тайваня, осуществляемый с 15 апреля 2006 г. В рамках эксперимента была образована группа из шести низкоорбитальных спутников с наклоном орбиты  $72^\circ$  и высотой 512 км (впоследствии высота орбиты была увеличена до 800 км). В течение суток производится в среднем около 2000 зондирований атмосферы, в том числе над океанами и труднодоступными районами суши. В результате почти в реальном времени доступны профили угла рефракции, температуры, давления и парциального давления водяного пара для нейтральной атмосферы, а также электронной концентрации в ионосфере. Вертикальные профили температуры воздуха в диапазоне высоты от 5 до 30 км могут быть определены с погрешностью менее 1 К. Выше 30 км ошибки определения температуры возрастают из-за влияния ионосферных флуктуаций и могут достигать 5 К [2].

Основная трудность при использовании данных радиозатменных наблюдений для анализа динамических процессов в атмосфере заключается в их крайне нерегулярном пространственно-временном распределении, что особенно ощутимо при исследовании высокочастотных возмущений. В связи с этим в большинстве работ, посвященных изучению атмосферных приливов на основе спутниковых данных, и данных эксперимента COSMIC в частности (см., например, [3]), рассматривается их среднемесячная изменчивость, в то время как наибольший интерес представляет внутрисезонная изменчивость.

В рамках настоящей работы предлагается методика обработки спутниковых данных для исследования глобальных атмосферных волн, позволяющая не только изучать среднемесячные характеристики, но также оценивать их внутрисезонную изменчивость. Полученные результаты использовались для проверки возможности изучения атмосферных приливов на основе данных современных реанализов ERA5 [4] и MERRA-2 [5], предоставляющих данные о температуре с временным разрешением 1 и 3 часа соответственно.

### Методика

Как отмечалось выше, данные радиозатменного зондирования имеют крайне нерегулярное распределение в пространстве и во времени, поэтому для перехода

к регулярной сетке использовалась аппроксимация распределения температуры на рассматриваемом уровне и в широтных поясах по  $10^\circ$ , центрированных широтами сетки, принятой в модели средней и верхней атмосферы (МСВА) [6, 7]. При аппроксимации учитывались постоянная составляющая и четыре гармоники с зональными волновыми числами  $m = 1 \dots 4$ , а зависимость температуры от долготы описывалась выражением

$$T_i^a = \sum_{j=1}^{2NG+1} x_j \Phi_j^i, \quad (1)$$

где  $x_j$  — коэффициенты аппроксимации;

$$\Phi_j^i = \sin(m\lambda_i) \text{ при } j = m = 1, 2, \dots, NG;$$

$$\Phi_j^i = \cos(m\lambda_i) \text{ при } j = NG + 1, NG + 2, \dots, 2NG;$$

$$\Phi_{2NG+1}^i = 1;$$

$NG = 4$  — число зональных гармоник, учтенных при аппроксимации;  $\lambda$  — долгота.

Аппроксимация производится по методу наименьших квадратов, т. е. определяется такой набор значений коэффициентов (параметров модели), при котором обеспечивается минимум суммы квадратов разности аппроксимированных и измеренных значений:

$$I = \sum_{i=1}^n (T_i^a - T_i)^2 = \sum_{i=1}^n [(Ax - b)_i]^2, \quad (2)$$

где  $n$  — число измерений;  $(A)_{ij} = \Phi_j^i$ ;  $b$  — вектор данных наблюдений.

Таким образом, задача наименьших квадратов сводится к решению уравнения  $Ax = b$ .

Для определения параметров модели и оценки числа обусловленности применяется сингулярное разложение (*Singular Value Decomposition*) матрицы  $A$  [8, 9].

Суть сингулярного разложения заключается в том, что для любой вещественной  $(m \times n)$  матрицы  $A$  существуют две вещественные ортогональные матрицы  $U$  и  $V$  размером  $(m \times m)$  и  $(n \times n)$  соответственно, такие что

$$U^T A V = \Sigma, \quad (3)$$

где  $\Sigma$  — диагональная матрица размером  $(m \times n)$ , диагональные элементы которой  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$ . Величины  $\sigma_i$  называются сингулярными числами матрицы  $A$ , наименьшее из которых равно расстоянию в 2-норме от матрицы  $A$  до ближайшей вырожденной матрицы. Если матрица  $A$  вырождена, то  $\sigma_n = 0$ . На практике сингулярные числа редко в точности равны нулю, но если матрица  $A$  «близка к вырожденной», то некоторые из сингулярных чисел будут очень малыми, а

значит, отношение  $\sigma_1/\sigma_n$  можно рассматривать как оценку числа обусловленности матрицы  $A$ .

Учитывая ортогональность матрицы  $U$ , имеем:

$$\|Ax - b\|_2 = \|U\Sigma V^T\|_2 = \|U^T(U\Sigma V^T x - b)\|_2 = \|\Sigma V^T x - U^T b\|_2. \quad (4)$$

Введя обозначения  $d = U^T b$  и  $z = V^T x$ , получим:

$$\|Ax - b\|_2 = \|\Sigma z - d\|_2 = (\sigma_1 z_1 - d_1)^2 + \dots + (\sigma_n z_n - d_n)^2 + d_{n+1}^2 + \dots + d_m^2. \quad (5)$$

Если ни одно из сингулярных чисел не равно нулю, то можно однозначно выбрать  $z_j$ , чтобы свести эту величину к минимуму:

$$\|Ax - b\|_2 = d_{n+1}^2 + \dots + d_m^2.$$

В этом случае задача наименьших квадратов имеет единственное решение. Если же  $\sigma_n = 0$ , то возможен произвольный выбор  $z_n$  и любой выбор даст одну и ту же остаточную сумму квадратов. Зная значения  $z_j$ , можно рассчитать параметры модели и получить амплитуды и фазы зональных гармоник. Оценка сингулярных чисел позволяет выявлять некачественные результаты. В работе [9] рекомендуется отбрасывать слишком малые сингулярные числа для повышения надежности вычислений, но такой подход не всегда работает. В связи с этим предлагается полностью исключать из дальнейшей обработки результаты с низкой обусловленностью, а к оставшимся данным применять методiku периодограмм Ломба-Скаргла [11], позволяющую заполнить «пробелы» и получить равномерные временные ряды амплитуд и фаз зональных гармоник. Критерий для отбраковки данных выбирается с помощью тестовых расчетов из условия устойчивости амплитуд, т. е. отбрасывание малых сингулярных чисел не приводит к значительному изменению амплитуд гармоник.

К временным рядам, восстановленным с помощью полученных амплитуд и фаз гармоник на долготях, смещенных на четверть длины волны, можно применить вейвлет-преобразование Морле [10], что позволяет в дальнейшем разделить волны на стационарные (неподвижные относительно земной поверхности) и бегущие на запад и восток [7].

Для исследования крупномасштабных возмущений при аппроксимации учитываются все данные, попадающие в рассматриваемые сутки, что позволяет получить амплитуды и фазы гармоник с разрешением 24 часа. Числа зондирований в течение суток, как правило, достаточно для результатов с хорошей обусловленностью, т. е. для получения устойчивых амплитуд (исключением являются полярные области). Для выявления высокочастотных возмущений, в частности атмосферных приливов, нужно иметь амплитуды и фазы гармоник с более высоким временным разрешением (по меньшей мере, трехчасовые данные). В связи с этим аппроксимация производилась для каждого трехчасового интервала за 7 дней с присвоением полученных результатов центральному дню и рассматриваемому моменту времени.

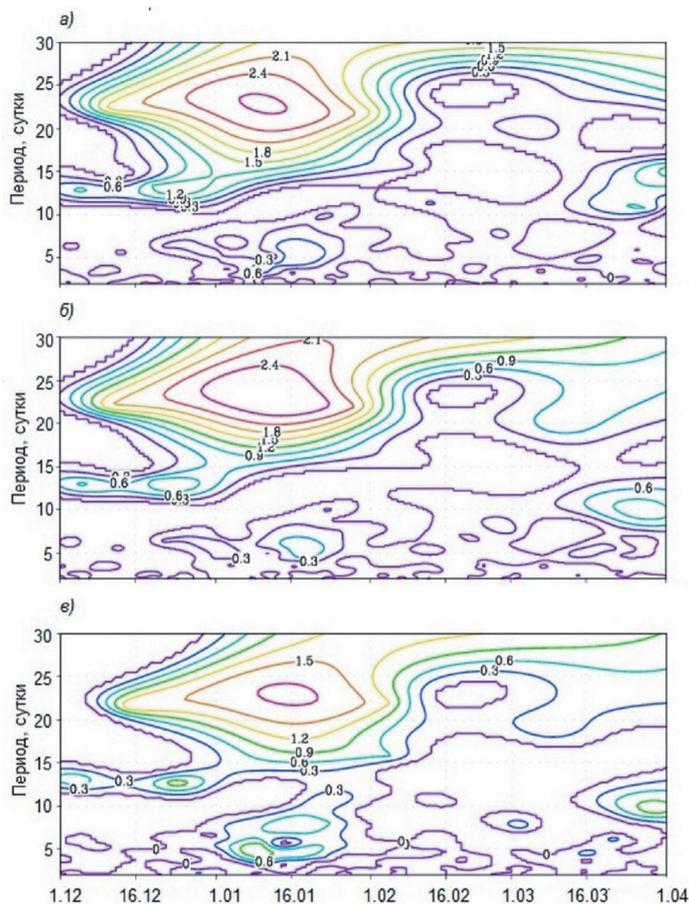


Рис. 1. Амплитуды бегущих на запад волн с  $m = 1$  в полях температуры по данным ERA5 (а), MERRA-2 (б) и COSMIC (в) на высоте 30 км и широте  $62,5^\circ$  с. для периода декабрь 2012 г. — март 2013 г.

Fig. 1. Observed changes of amplitude wavelet spectra for westward propagating PW1 in temperature at 30 km,  $62,5^\circ$  N in December 2012—March 2013: ERA5 (a), MERRA-2 (b) and COSMIC (c).

## Результаты

На рис. 1 приведены результаты для бегущих на запад волн с зональным волновым числом  $m = 1$  по температурным данным эксперимента COSMIC и данным реанализов ERA5 и MERRA-2 на широте  $62,5^\circ$  с. и высоте 30 км для зимы 2012/13 г. Из рисунка видно, что результаты качественно согласуются, но для периодов менее 10 суток амплитуды планетарных волн с  $m = 1$  по данным COSMIC больше амплитуд, полученных на основе данных реанализов, в то время как для более длительных периодов ситуация меняется и возмущения по данным реанализов

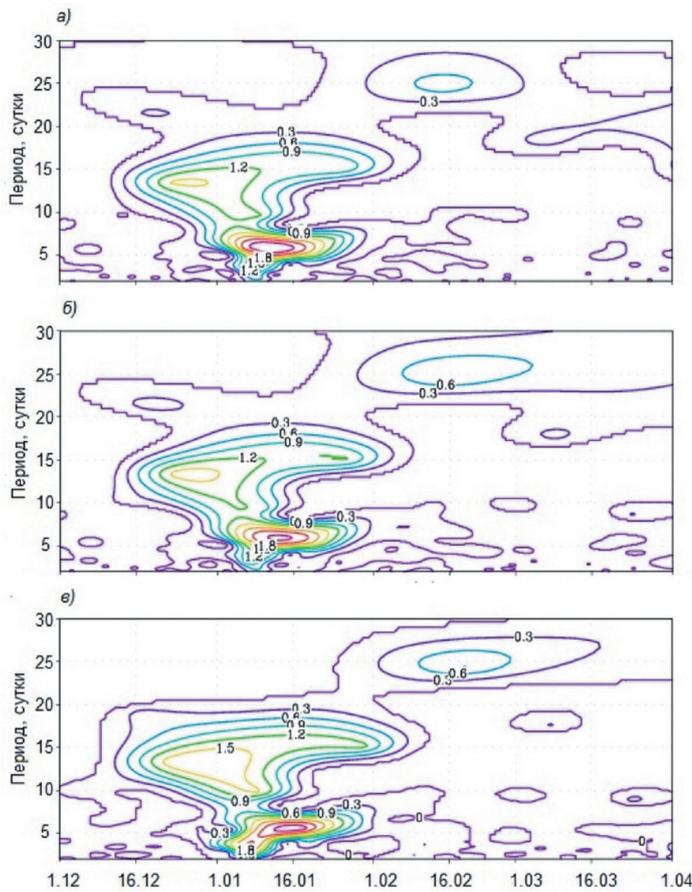


Рис. 2. Амплитуды бегущих на запад волн с  $m = 2$  в полях температуры по данным ERA5 (а), MERRA-2 (б) и COSMIC (в) на высоте 30 км и широте  $62,5^\circ$  с. для периода декабрь 2012 г. — март 2013 г.

Fig. 2. Observed changes of amplitude wavelet spectra for westward propagating PW2 in temperature at 30 km,  $62,5^\circ$  N in December 2012—March 2013: ERA5 (a), MERRA-2 (b) and COSMIC (c).

несколько сильнее. Расхождения в значениях амплитуд незначительны и могут быть связаны с разными схемами ассимиляции данных в ERA5 и MERRA-2.

На рис. 2 показаны аналогичные результаты для планетарных волн с зональным волновым числом  $m = 2$ . Из рисунка видно хорошее качественное и количественное согласие в амплитудах возмущений для всех рассматриваемых данных.

На рисунках заметны максимумы, близкие к резонансным частотам: на периодах 5, 10 и 16 суток для зонального волнового числа  $m = 1$  и на периодах 4, 7 и 12 суток для  $m = 2$ . Таким образом, все данные позволяют обнаруживать

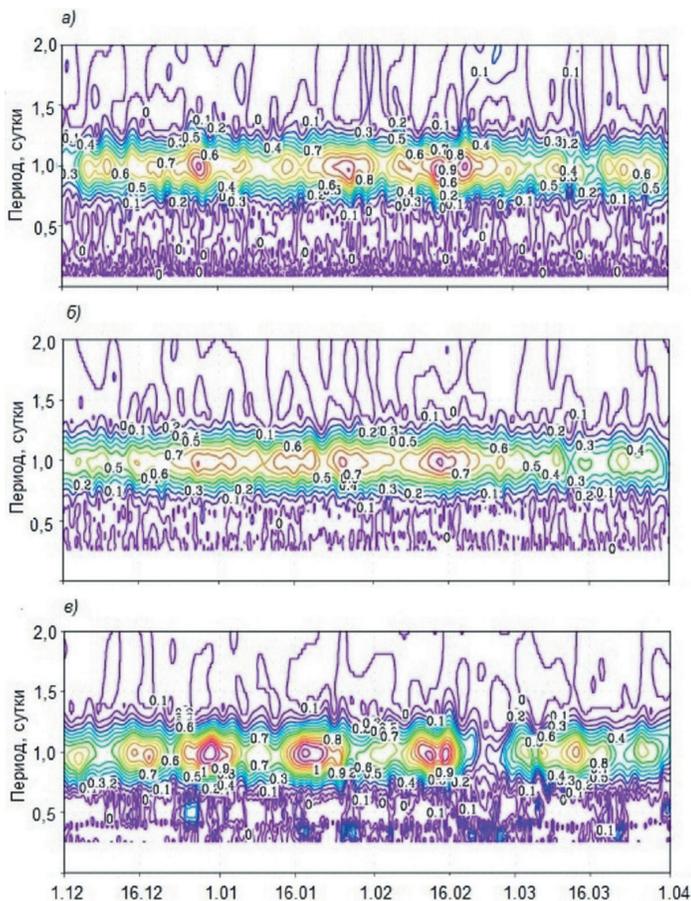


Рис. 3. Амплитуды бегущих на запад волн с  $m = 1$  в полях температуры по данным ERA5 (а), MERRA-2 (б) и COSMIC (в) на высоте 30 км и широте  $2,5^\circ$  с. для периода декабрь 2012 г. — март 2013 г.

Fig. 3. Observed changes of amplitude wavelet spectra for westward propagating PW1 in temperature at 30 km,  $62,5^\circ$  N in December 2012—March 2013: ERA5 (a), MERRA-2 (b) and COSMIC (c).

планетарные волны на высотах стратосферы. Следует отметить, что амплитуды осцилляций в поле температуры характеризуют, главным образом, условия распространения волн, поэтому для полного анализа необходимо рассматривать поля геопотенциальной высоты. Поле геопотенциальной высоты на основе данных о температуре можно восстановить с помощью уравнения гидростатики [12].

На рис. 3 представлены результаты для бегущих на запад волн с зональным волновым числом  $m = 1$  по температурным данным эксперимента COSMIC и данным реанализов ERA5 и MERRA-2 на широте  $2,5^\circ$  с. и высоте 30 км. Анализ

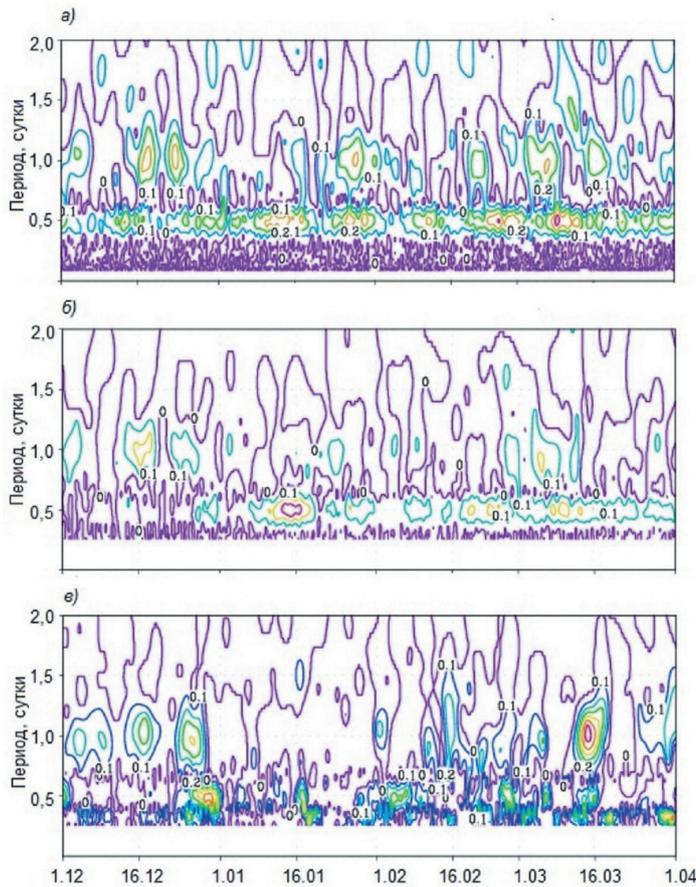


Рис. 4. Амплитуды бегущих на запад волн с  $m = 2$  в полях температуры по данным ERA5 (а), MERRA-2 (б) и COSMIC (в) на высоте 30 км и широте  $2,5^\circ$  с. для периода декабрь 2012 г. — март 2013 г.

Fig. 4. Observed changes of amplitude wavelet spectra for westward propagating PW2 in temperature at 30 km,  $62,5^\circ$  N in December 2012—March 2013: ERA5 (a), MERRA-2 (b) and COSMIC (c).

результатов показывает, что амплитуды суточного прилива по данным эксперимента COSMIC несколько больше амплитуд по данным реанализов; при этом амплитуды на основе данных MERRA-2 меньше, чем по данным ERA5. Разница в значениях амплитуд может быть вызвана сглаживанием данных реанализа при ассимиляции, которая сильнее для большего разрешения по времени. Качественно результаты согласуются, но в некоторые моменты разнятся, поэтому нельзя однозначно сказать, какие данные более точные.

На рис. 4 приведены аналогичные результаты для планетарных волн с зональным волновым числом  $m = 2$ . Из рисунка видно, что полусуточный прилив по MERRA-2 более сглажен по сравнению с ERA5. Результаты по данным эксперимента COSMIC имеют «рваную» структуру, что может быть обусловлено нехваткой данных. Тем не менее отдельные максимумы качественно совпадают для всех данных. Также можно отметить, что суточный немигрирующий прилив просматривается лучше и может анализироваться. В перспективе ситуация может улучшиться в связи с запуском в рамках эксперимента COSMIC-2 / FORMOSAT-7 шести новых спутников, которые будут давать дополнительно порядка 4000 профилей атмосферных параметров для широтной зоны от  $40^\circ$  ю.ш. до  $40^\circ$  с.ш. [13].

### Заключение

Представлена методика обработки данных радиозатменных наблюдений для исследования глобальных атмосферных волн с учетом их изменчивости. Сравнение результатов, полученных на основе данных эксперимента COSMIC и современных реанализов, показало, что характеристики планетарных волн по обоим видам данных качественно и количественно согласуются. При анализе приливных колебаний было выявлено, что амплитуды суточного прилива по данным COSMIC несколько больше, чем по данным реанализов, которые более сглажены (особенно для MERRA-2). Полусуточный прилив на основе данных радиозатменных наблюдений воспроизводится хуже, что связано с недостаточным разрешением по времени, получаемом в эксперименте COSMIC. Это может измениться по мере появления дополнительных данных измерений в рамках проекта COSMIC-2.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-05-01050.

### Список литературы

1. Anthes R. A., Bernhardt P.A., Chen Y., Cucurull L., Dymond K.F., Ector D., Healy S.B., Ho S. -P., Hunt D.C., Kuo Y.-H., Liu H., Manning K., McCormick C., Meehan T.K., Randel W.J., Rocken C., Schreiner W.S., Sokolovskiy S.V., Syndergaard S., Thompson D.C., Trenberth K.E., Wee T.-K., Yen N.L., Zeng Z. The COSMIC / FORMOSAT-3 Mission. Early results // Bull. Amer. Met. Soc. 2008. V. 89. P. 313—333.
2. Rocken C., Kuo Y.-H., Sokolovskiy S., Anthes R. A. The ROCSAT-3/COSMIC Mission and Applications of GPS Radio Occultation Data to Weather and Climate / In: Remote Sensing Applications of the Global Positioning System / Ed. by M. Bevis, Y. Shoji, S. Businger. 2004. V. 5661. P. 1—12.
3. Pirscher B., Foelsche U., Borsche M., Kirchengast G., Kuo Y.-H. Analysis of migrating diurnal tides detected in FORMOSAT-3 / COSMIC temperature data // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, D14108, doi:10.1029/2009JD013008.
4. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (дата обращения: 15.02.2020).
5. Gelaro R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. No. 30. P. 5419—5454.

6. Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 463—475.
7. Pogoreltsev, A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. No. 69. P. 2083—2101 doi:10.1016/j.jastp.2007.05.014.
8. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Пер. с англ. Х.Д. Икрамова. М.: Наука, 1986. 232 с.
9. Forsythe G., Malcolm M., Moler C. Computer Methods for Mathematical Computations // Prentice Hall. 1st edition. 1977. 259 p.
10. Torrence Ch., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Met. Soc. 1998. V. 79. No. 1. P. 61—78.
11. Press W. H., Teukolsky S.A. Search algorithm for weak periodic signal in unevenly spaced data // Computers in Phys. 1988. No. 2. P. 77—82.
12. Зарубин А.С., Погорельцев А.И. Планетарные волны в зимней стратосфере Северного полушария на основе данных наблюдений эксперимента COSMIC // Ученые записки РГТМУ. 2012. № 26. С. 91—99.
13. URL: <https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/cosmic-2/> (дата обращения: 15.02.2020).

### References

1. Anthes R. A., Bernhardt P.A., Chen Y., Cucurull L., Dymond K.F., Ector D., Healy S.B., Ho S. -P., Hunt D.C, Kuo Y.-H., Liu H., Manning K., McCormick C., Meehan T.K., Randel W.J., Rocken C., Schreiner W.S., Sokolovskiy S.V., Syndergaard S., Thompson D.C., Trenberth K.E., Wee T.-K., Yen N.L., Zeng Z. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission. Early results. Bull. American Meteorological Society. 2008, 89: 313—333.
2. Rocken C., Kuo Y.-H., Sokolovskiy S., Anthes R. A. The ROCSAT-3/COSMIC Mission and Applications of GPS Radio Occultation Data to Weather and Climate. Remote Sensing Applications of the Global Positioning System. Edited by Michael Bevis, Yoshinori Shoji, Steven Businger. 2004, 5661: 1—12.
3. Pirscher, B., Foelsche U., Borsche M., Kirchengast G., Kuo Y. -H. Analysis of migrating diurnal tides detected in FORMOSAT-3 / COSMIC temperature data. J. Geophys. Res. 2010, 115. D14108, doi:10.1029/2009JD013008.
4. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (accessed 15 February 2020).
5. Gelaro R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2). J. Climate. 2017, 30: 5419—5454.
6. Pogoreltsev A.I. Generation of normal atmospheric modes by stratospheric vacillations. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery` i okeana*. RAS news. Atmospheric and Oceanic Physics. 2007, 43, 4: 423—435.
7. Pogoreltsev, A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007, 69: 2083—2101.
8. Lawson Ch., Henson R. *Chislennoe reshenie zadach metoda naimen'shih kvadratov*. Solving Least Squares Problems. Translated by Kh. D. Ikramova. Moscow: Nauka. 1986: 232 p. [In Russian]
9. Forsythe G., Malcolm M., Moler C. Computer Methods for Mathematical Computations. Prentice Hall; 1st edition. 1977: 259 p.
10. Torrence Ch., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. Bull. Amer. Met. Soc. 1998, 79, 1: 61—78.
11. Press W. H., Teukolsky S.A. Search algorithm for weak periodic signal in unevenly spaced data. Computers in Phys. 1988, 2: 77—82.
12. Zarubin A. S., Pogoreltsev A. I. Planetary waves in the winter stratosphere of northern hemisphere on the basis of COSMIC experiment observations. *Uchenye zapiski RSHU*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2012, 26: 91—99. [In Russian].
13. URL: <https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/cosmic-2/> (accessed 15 February 2020).

Статья поступила 9.02.2020

Принята в печать 05.03.2020

***Сведения об авторах***

*Зарубин Антон Сергеевич*, стажер, Российский государственный гидрометеорологический университет, e-mail: a-zarubin@mail.ru

*Шириов Николай Васильевич*, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела, ФГУП «ЦЭНКИ», e-mail: nsh@bk.ru

*Погорельцев Александр Иванович*, д-р физ.-мат. наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, e-mail: apogor@rshu.ru

***Information about authors***

*Zarubin Anton Sergeevich*, intern, Russian State Hydrometeorological University

*Shirshov Nikolay Vasilievich*, Phd in Phys. and Math. Sci., head of department, FSUE «TsENKI»

*Pogoreltsev Alexander Ivanovich*, D. Sci. in Phys. and Math. Sci., professor, Russian State Hydrometeorological University