

ГЕОФИЗИКА / GEOPHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.41>

АКТИВНОСТЬ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ ПО ФЛУКТУАЦИЯМ СИГНАЛА В СПУТНИКОВЫХ РАДИОЗАТМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Научная статья

Кан В.¹, Федорова О.В.^{2,*}, Шмаков А.В.³^{1,2,3} Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ovfedorova[at]mail.ru)

Аннотация

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) играют важнейшую роль в энергетическом обмене, глобальной циркуляции и перемешивании атмосферы. Приведены широтные распределения потенциальной энергии ВГВ в атмосфере, восстановленные по измерениям флуктуаций амплитуды сигнала в спутниковых радиозатменных наблюдениях GPS-COSMIC (Global Positioning System - Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) в зимний и летний сезоны 2011 г. Восстановление проведено в диапазоне высот от верхней границы тропопаузы до 28 км. Сравнение полученных результатов с результатами других многочисленных зондовых и спутниковых измерений указывает на их удовлетворительное согласие. Показано, что разработанный метод и полученные результаты могут быть успешно использованы для задач глобального мониторинга активности ВГВ в атмосфере.

Ключевые слова: радиозатменное зондирование атмосферы, флуктуации амплитуды сигнала, широтное распределение активности внутренних гравитационных волн.

ACTIVITY OF INTERNAL GRAVITATIONAL WAVES IN THE ATMOSPHERE BY SIGNAL FLUCTUATIONS IN SATELLITE RADIO OCCULTATION OBSERVATIONS

Research article

Kan V.¹, Fedorova O.V.^{2,*}, Shmakov A.V.³^{1,2,3} Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (ovfedorova[at]mail.ru)

Abstract

Internal gravitational waves (IGW) play a crucial role in the energy exchange, global circulation, and mixing of the atmosphere. The latitudinal distributions of potential energy of IGW in the atmosphere, reconstructed from measurements of signal amplitude fluctuations in the GPS-COSMIC (Global Positioning System - Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) satellite radio occultation observations during the winter and summer seasons of 2011 are presented. The reconstruction was carried out in the range of heights from the upper limit of the tropopause to 28 km. Comparison of the obtained results with the results of numerous other probe and satellite measurements indicates their satisfactory consistency. It is shown that the developed method and the obtained results can be successfully used for the tasks of global monitoring of HBV activity in the atmosphere.

Keywords: radio occultation probing of the atmosphere, signal amplitude fluctuations, latitudinal distribution of internal gravity wave activity.

Введение

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) представляют собой основной механизм генерации мезомасштабных неоднородностей скорости ветра, плотности и температуры в атмосфере. ВГВ активно участвуют в процессах переноса энергии, циркуляции и перемешивания в атмосфере [1]. Наиболее точную и подробную информацию о ветре и температуре обеспечивают радиозонды [2], [3]. Но по-настоящему непрерывные и глобальные исследования могут обеспечить только большие спутниковые системы. В настоящее время активно ведутся радиозатменные измерения излучений навигационных спутников GPS с помощью низкоорбитальных систем приемных спутников [4], [5], [6]. Высокостабильные радиоизлучения GPS используются для измерений атмосферного сдвига фазы и, на их основе, для восстановления профилей температуры. Так, например, система из 24 спутников GPS и 6 приемных спутников COSMIC обеспечивала до 3 тысяч сеансов измерений в сутки.

Понимание важности ВГВ в атмосферных исследованиях активно способствует внедрению новых способов спутникового мониторинга волн [1], [7]. В [8], [9] рассмотрены основные соотношения и изложена методика восстановления основных характеристик ВГВ по флуктуационным измерениям амплитуды радиосигнала в спутниковом эксперименте. В [9], [10] протестирована методика и приведены результаты широтного распределения параметров ВГВ по данным GPS-COSMIC. По восстановленным параметрам определялась потенциальная энергия волн, которая служит основным показателем активности ВГВ.

Целью данной статьи является подробное сравнение широтных распределений потенциальной энергии ВГВ с результатами других измерений – зондовых и спутниковых наблюдений в радио- и оптическом диапазонах длин волн.

Методика

Турбулентность и ВГВ генерируют неоднородности в атмосфере, которые вызывают флуктуации характеристик распространяющегося излучения. При оптическом зондировании они вносят примерно близкие вклады в флуктуации интенсивности сигнала [11]. В радиодиапазоне для GPS определяющую роль играют внутренние волны, а доля турбулентности пренебрежимо мала [8]. Поэтому спутниковые радиозатменные наблюдения являются удобным инструментом для исследования ВГВ. Общие корни радио- и оптического зондирований и их специфические особенности рассмотрены в [8], [12].

Свойства случайно неоднородной среды, в которой распространяется излучение, задаются трехмерным спектром относительных пульсаций индекса рефракции или температуры (без учета влажности) [13]. Используемая нами в [8] и [9] модель спектра [14] является трехмерным обобщением известного «универсального» спектра насыщенных ВГВ [15], [16]. В [8] и [9], на основе традиционных для затменных наблюдений аппроксимаций фазового экрана и слабых флуктуаций, получено простое соотношение для связи измеряемого вертикального спектра флуктуаций амплитуды радиосигнала $V_{\delta A/\bar{A}}(K_z)$ с вертикальным спектром ВГВ флуктуаций температуры $V_{\delta T/\bar{T}}(K_z)$. Здесь K_z – вертикальное волновое число, δA и δT – соответственно, флуктуации амплитуды сигнала и температуры, а \bar{A} и \bar{T} – их средние значения.

По восстановленным параметрам спектра ВГВ вычислялись интегральные энергетические величины, характеризующие активность ВГВ: дисперсия флуктуаций температуры $\sigma_{\delta T}^2$ и удельная (на единицу массы) потенциальная энергия E_p [1], [3], [17]:

$$\sigma_{\delta T}^2 = \int_0^{\infty} V_{\delta T/\bar{T}}(K_z) dK_z \quad (1)$$

$$E_p = \frac{g^2}{2\bar{T}^2 \omega_{B.V.}^2} \sigma_{\delta T}^2 \quad (2)$$

Здесь $\omega_{B.V.}^2$ – частота Брента-Вьяйсяля и g – ускорение свободного падения.

Сравнительный анализ широтного распределения потенциальной энергии ВГВ

По данным измерений GPS-COSMIC летом и зимой 2011 г. были восстановлены широтные распределения основных параметров ВГВ [10]. Восстановление производилось в полосах широт 0° – 20° , 20° – 40° , 40° – 60° , 60° – 90° обоих полушарий. По восстановленным параметрам определялись дисперсия флуктуаций температуры и потенциальная энергия ВГВ. В каждом сезоне были использованы серии по 20000 реализаций измерений. Параметры определялись в интервале высот от тропопаузы до 28 км.

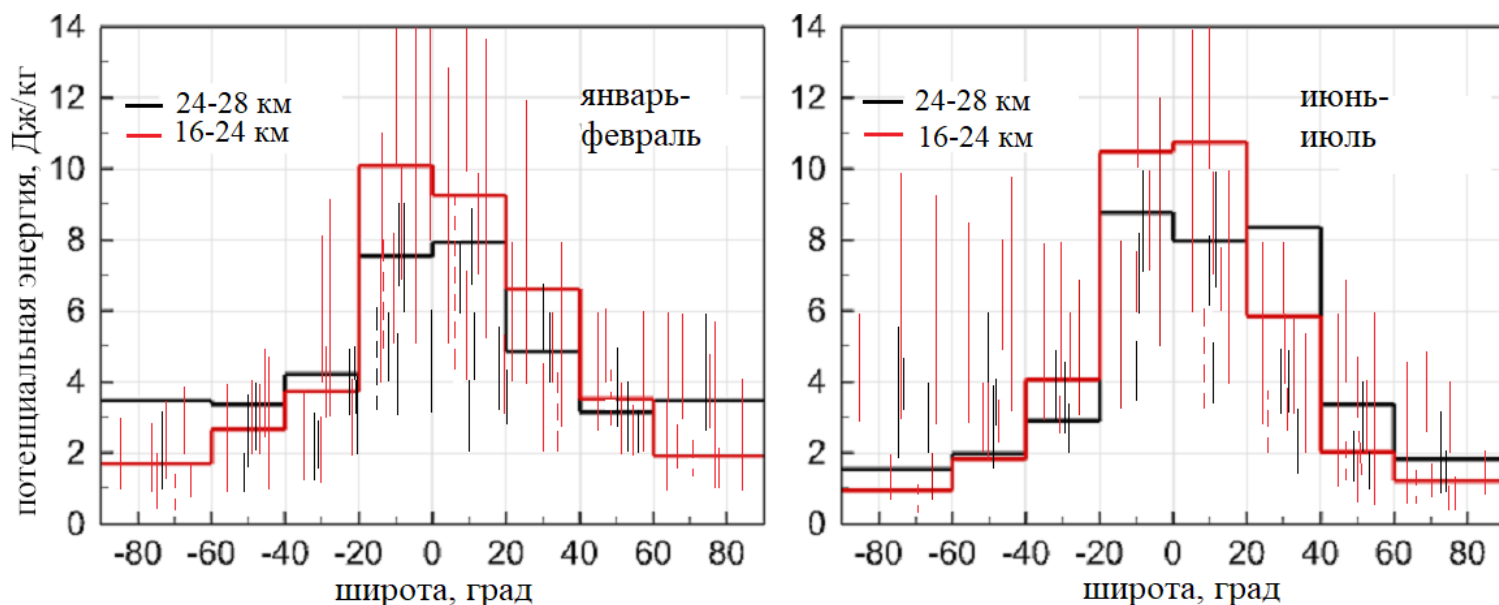


Рисунок 1 - Широтные распределения потенциальной энергии ВГВ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.41.1>

Примечание: ступенчатые сплошные линии – широтные распределения потенциальной энергии ВГВ для интервалов высот 16-24 км (красные) и 24-28 км (черные); вертикальные сплошные отрезки – результаты GPS измерений и наблюдений мерцаний звезд; штриховые отрезки – результаты зондовых измерений

На рис. 1 приведены восстановленные широтные распределения удельной потенциальной энергии [10]. Вертикальными отрезками разных цветов показаны результаты других авторов, полученные в данной полосе широт и высот: сплошные отрезки – результаты, полученные по GPS восстановленным профилям температуры [4], [17], [18], [21] и по наблюдениям мерцаний звезд [22], штриховые отрезки – результаты зондовых измерений [2], [3], [21], [23]. Высота отрезков соответствует оценке вариативности измерений, включающей в себя как ошибки измерений, так и естественную изменчивость параметров ВГВ. Следует отметить, что все сведения, использованные нами для сравнения, представляют собой результаты многолетних измерений, опирающихся на большие статистические базы данных. Так, например, результаты [4] получены по зондовым измерениям, которые проводились в течение 5 лет на 100 станциях зондирования, расположенных в северном полушарии от субтропиков до высоких широт.

Параметры ВГВ отличаются высокой пространственно-временной изменчивостью, и это хорошо видно на рис. 1. В этом плане характерными являются результаты зондовых измерений [2], полученные в течение 5 лет на одной станции зондирования. Вся база данных обрабатывалась по одним алгоритмам. При этом, спектральные амплитуды ВГВ могли меняться в 10 и более раз от реализации к реализации для схожих условий наблюдений.

Специфические особенности распределения потенциальной энергии рассмотрены в [10]. Здесь мы отметим только некоторые из них. Максимальные значения характерны для экваториальной зоны. Это обстоятельство указывает на ведущую роль конвективных процессов при генерации ВГВ в тропиках [1], [4]. Высокие показатели активности ВГВ в этой зоне могут быть дополнительно связаны с волнами Кельвина [4], [5], [18]. Активность ВГВ уменьшается при перемещении от тропиков к полярным областям. В целом, потенциальная энергия распределена примерно симметрично в обоих полушариях, но в высоких широтах северного полушария значения зимой в два раза выше, чем летом.

Как видно из рис. 1, наши результаты вполне удовлетворительно согласуются с результатами других работ, учитывая достаточно высокую вариативность параметров ВГВ. Отмеченная в наших наблюдениях повышенная зимняя активность ВГВ в полярной области северного полушария отмечается и в других работах. Зимой в полярной области южного полушария наблюдается заметный разброс значений потенциальной энергии – от высоких значений [4], [17], [22], [23] до умеренно повышенных [5], [19], [21]. В ряде работ [6], [18] (в том числе и в наших исследованиях) высокой зимней активности не наблюдалось. Отметим также, что повышенная активность ВГВ в полярных областях южного полушария, как правило, смещена ближе к августу-сентябрю.

Заключение

Отметим следующие основные положения.

Разработанная методика позволяет восстанавливать основные параметры ВГВ в атмосфере по амплитудным измерениям сигнала в радиозатменных наблюдениях.

Результаты обработки данных измерений GPS-COSMIC показывают, что методика и полученные данные могут успешно использоваться для мониторинга ВГВ в атмосфере.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Fritts D.C. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere / D.C. Fritts, M.J. Alexander // *Reviews of Geophysics*. – 2003. – Vol. 41(1). – P. 3-1–3-64. – DOI:10.1029/2001RG000106.
2. Nastrom G.D. Vertical wavenumber spectra of wind and temperature from high-resolution balloon soundings over Illinois / G.D. Nastrom, T.E. Van Zandt, J.M. Warnock // *Journal of Geophysical Research*. – 1997. – Vol. 102(D6). – P. 6685–6701. – DOI:10.1029/96JD03784.
3. Wang L. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters. Part I: Intrinsic frequency, wavelength, and vertical propagation direction / L. Wang, M.A. Geller, M.J. Alexander // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2005. – Vol. 62(1). – P. 125–142. – DOI:10.1175/JAS-3364.1.
4. Tsuda T. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET) / T. Tsuda, M. Nishida, C. Rocken et al. // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105(D6). – P. 7257–7273. – DOI:10.1029/1999JD901005.
5. Schmidt T. Stratospheric gravity wave momentum flux from radio occultations / T. Schmidt, P. Alexander, A. de la Torre // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2016. – Vol. 121(9). – P. 4443–4467. – DOI:10.1002/2015JD024135.
6. Rapp M. An intercomparison of stratospheric gravity wave potential energy densities from METOP GPS radio occultation measurements and ECMWF model data / M. Rapp, A. Dörnbrack, B. Kaifler // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – Vol. 11(2). – P. 1031–1048. – DOI:10.5194/amt-11-1031-2018.
7. Горбунов М. Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли / М.Е. Горбунов. – М. : ГЕОС, 2019. – 288 с.
8. Kan V. Fluctuations of radio occultation signals in sounding the Earth's atmosphere / V. Kan, M.E. Gorbunov, V.F. Sofieva // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – Vol. 11(2). – P. 663–680. – DOI:10.5194/amt-11-663-2018.

9. Кан В. Восстановление параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды сигнала в радиозатменном эксперименте / В. Кан, М. Е. Горбунов, А. В. Шмаков и др. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56. – № 5. – С. 499–513. – DOI:10.31857/S0002351520050077.
10. Кан В. Широтное распределение параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды радиозатменных сигналов / В. Кан, М. Е. Горбунов, О.В. Федорова и др. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56. – № 6. – С. 647–659. – DOI:10.31857/S000235152006005X.
11. Sofieva V.F. Reconstruction of internal gravity waves and turbulence parameters in the stratosphere using GOMOS scintillation measurements / V.F. Sofieva, A.S. Gurvich, F. Dalaudier et al. // Journal of Geophysical Research. – 2007. – V. 112. – D12113. – DOI:10.1029/2006JD007483.
12. Гурвич А. С. Флуктуации радиоволн на трассах спутник-атмосфера-спутник: оценки по наблюдениям мерцаний звезд и сравнение с экспериментом / А.С. Гурвич, В. Кан // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 33. – № 3. – С. 314–323.
13. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский – М.: Наука, 1967. – 548 с.
14. Gurvich A.S. Study of the turbulence and inner waves in the stratosphere based on the observations of stellar scintillations from space: A model of scintillation spectra / A.S. Gurvich, V.L. Brekhovskikh // Waves in Random Media. – 2001. – Vol. 11(3). – P. 163–181.
15. Smith S.A. Evidence of saturation spectrum of atmospheric gravity waves / S.A. Smith, D.C. Fritts, T.E. Van Zandt // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1987. – Vol. 44(10). – P. 1404–1410.
16. Dewan E. M. Saturation and the “universal” spectrum for vertical profiles of horizontal scalar winds in atmosphere / E.M. Dewan, R.F. Good // Journal of Geophysical Research. – 1986. – Vol. 91(D2) – P. 2742–2748. – DOI:10.1029/JD091iD02p02742.
17. Tsuda T. Vertical wave number spectrum of temperature fluctuations in the stratosphere using GPS occultation data / T. Tsuda, K. Hocke // Journal of the Meteorological Society of Japan. – 2002 – Vol. 80(4B). – P. 925–938. – DOI:10.2151/jmsj.80.925.
18. Schmidt T. Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data / T. Schmidt, A. de la Torre, J. Wickert // Geophysical Research Letters. – 2008. – Vol. 35. – L16807. – DOI:10.1029/2008GL034986.
19. Hei H. Characteristics of atmospheric gravity wave activity in the polar regions revealed by GPS radio occultation data with CHAMP / H. Hei, T. Tsuda, T. Hirooka // Journal of Geophysical Research. – 2008. – Vol. 113. – D04107. – DOI:10.1029/2007JD008938.
20. Tsuda T. Characteristics of gravity waves with short vertical wavelengths observed with radiosonde and GPS occultation during DAWEX (Darwin Area Wave Experiment) / T. Tsuda, M. V. Ratnam, P. T. May et al. // Journal of Geophysical Research. – 2004. – Vol. 109. – D20S03. – DOI:10.1029/2004JD004946.
21. Ratnam M. V. Global and seasonal variations of stratospheric gravity wave activity deduced from the CHAMP/GPS satellite / M. V. Ratnam, G. Tetzlaff, C. Jacobi // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2004. – Vol. 61(13). – P. 1610–1620. – DOI:10.1175/1520-0469(2004)061<1610:GASVOS>2.0.CO;2.
22. Sofieva V.F. High-resolution temperature profiles retrieved from bichromatic stellar scintillation measurements by GOMOS/Envisat / V.F. Sofieva, F. Dalaudier, A. Hauchecorne et al. // Atmospheric Measurement Techniques. – 2019. – Vol. 12. – P. 585–598. – DOI:10.5194/amt-12-585-2019.
23. Yoshiki M. A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde / M. Yoshiki, K. Sato // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105(D14). – P. 17995–18011. – DOI:10.1029/2000JD900204.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fritts D.C. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere / D.C. Fritts, M.J. Alexander // Reviews of Geophysics. – 2003. – Vol. 41(1). – P. 3-1–3-64. – DOI:10.1029/2001RG000106.
2. Nastrom G.D. Vertical wavenumber spectra of wind and temperature from high-resolution balloon soundings over Illinois / G.D. Nastrom, T.E. Van Zandt, J.M. Warnock // Journal of Geophysical Research. – 1997. – Vol. 102(D6). – P. 6685–6701. – DOI:10.1029/96JD03784.
3. Wang L. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters. Part I: Intrinsic frequency, wavelength, and vertical propagation direction / L. Wang, M.A. Geller, M.J. Alexander // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2005. – Vol. 62(1). – P. 125–142. – DOI:10.1175/JAS-3364.1.
4. Tsuda T. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET) / T. Tsuda, M. Nishida, C. Rocken et al. // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105(D6). – P. 7257–7273. – DOI:10.1029/1999JD901005.
5. Schmidt T. Stratospheric gravity wave momentum flux from radio occultations / T. Schmidt, P. Alexander, A. de la Torre // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2016. – Vol. 121(9). – P. 4443–4467. – DOI:10.1002/2015JD024135.
6. Rapp M. An intercomparison of stratospheric gravity wave potential energy densities from METOP GPS radio occultation measurements and ECMWF model data / M. Rapp, A. Dörnbrack, B. Kaifler // Atmospheric Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 11(2). – P. 1031–1048. – DOI:10.5194/amt-11-1031-2018.
7. Gorbunov M. E. Fizicheskie i matematicheskie principy sputnikovogo radiozatmennogo zondirovaniya atmosfery Zemli [Physical and mathematical foundations of satellite radio occultation sounding of the Earth's atmosphere] / M. E. Gorbunov. – М.: GEOS, 2019. – 288 p. [in Russian]
8. Kan V. Fluctuations of radio occultation signals in sounding the Earth's atmosphere / V. Kan, M.E. Gorbunov, V.F. Sofieva // Atmospheric Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 11(2). – P. 663–680. – DOI:10.5194/amt-11-663-2018.
9. Kan V. Vosstanovlenie parametrov vnutrennih voln v atmosfere po fluktuacijam amplitudy signala v radiozatmennom jeksperimente [The reconstruction of the parameters of internal gravity waves in the atmosphere from amplitude fluctuations in

the radio occultation experiment] / V. Kan, M. E. Gorbunov, A. V. Shmakov et al. // *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. – 2020. – Vol. 56(5). – P. 499–513. – DOI: 10.31857/S0002351520050077. [in Russian]

10. V. Kan. Shirotnoe raspredelenie parametrov vnutrennih voln v atmosfere po fluktuacijam amplitudy radiozatsmennih signalov [Latitudinal distribution of the parameters of internal gravity waves in the atmosphere derived from amplitude fluctuations of radio occultation signals] / V. Kan, M. E. Gorbunov, O. V. Fedorova et al. // *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. – 2020. – Vol. 56(6). – P. 647–659. – DOI: 10.31857/S000235152006005X. [in Russian]

11. Sofieva V.F. Reconstruction of internal gravity waves and turbulence parameters in the stratosphere using GOMOS scintillation measurements / V.F. Sofieva, A.S. Gurvich, F. Dalaudier et al. // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – V. 112. – D12113. – DOI:10.1029/2006JD007483.

12. Gurvich A. S. Fluktuacii radiovoln na trassah sputnik-atmosfera-sputnik: ocenki po nabljudenijam mercanij zvezd i sravnenie s jeksperimentom [Radio wave fluctuations in satellite-atmosphere-satellite links: estimates from stellar scintillation observations and their comparison with experimental data] / A. S. Gurvich, V. Kan // *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics] – 1997. – Vol. 33. – № 3. – P. 314–323. [in Russian]

13. Tatarskij V. I. Rasprostranenie voln v turbulentoj atmosfere [Wave propagation in turbulent atmosphere] / V. I. Tatarskij. – M.: Nauka, 1967. – 548 p. [in Russian]

14. Gurvich A.S. Study of the turbulence and inner waves in the stratosphere based on the observations of stellar scintillations from space: A model of scintillation spectra / A.S. Gurvich, V.L. Brekhovskikh // *Waves in Random Media*. – 2001. – Vol. 11(3). – P. 163–181.

15. Smith S.A. Evidence of saturation spectrum of atmospheric gravity waves / S.A. Smith, D.C. Fritts, T.E. Van Zandt // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1987. – Vol. 44(10). – P. 1404–1410.

16. Dewan E. M. Saturation and the “universal” spectrum for vertical profiles of horizontal scalar winds in atmosphere / E.M. Dewan, R.F. Good // *Journal of Geophysical Research*. – 1986. – Vol. 91(D2) – P. 2742–2748. – DOI:10.1029/JD091iD02p02742.

17. Tsuda T. Vertical wave number spectrum of temperature fluctuations in the stratosphere using GPS occultation data / T. Tsuda, K. Hocke // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. – 2002 – Vol. 80(4B). – P. 925–938. – DOI:10.2151/jmsj.80.925.

18. Schmidt T. Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data / T. Schmidt, A. de la Torre, J. Wickert // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35. – L16807. – DOI:10.1029/2008GL034986.

19. Hei H. Characteristics of atmospheric gravity wave activity in the polar regions revealed by GPS radio occultation data with CHAMP / H. Hei, T. Tsuda, T. Hirooka // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113. – D04107. – DOI:10.1029/2007JD008938.

20. Tsuda T. Characteristics of gravity waves with short vertical wavelengths observed with radiosonde and GPS occultation during DAWEX (Darwin Area Wave Experiment) / T. Tsuda, M. V. Ratnam, P. T. May et al. // *Journal of Geophysical Research*. – 2004. – Vol. 109. – D20S03. – DOI:10.1029/2004JD004946.

21. Ratnam M. V. Global and seasonal variations of stratospheric gravity wave activity deduced from the CHAMP/GPS satellite / M. V. Ratnam, G. Tetzlaff, C. Jacobi // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2004. – Vol. 61(13). – P. 1610–1620. – DOI:10.1175/1520-0469(2004)061<1610:GASVOS>2.0.CO;2.

22. Sofieva V.F. High-resolution temperature profiles retrieved from bichromatic stellar scintillation measurements by GOMOS/Envisat / V.F. Sofieva, F. Dalaudier, A. Hauchecorne et al. // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2019. – Vol. 12. – P. 585–598. – DOI:10.5194/amt-12-585-2019.

23. Yoshiki M. A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde / M. Yoshiki, K. Sato // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105(D14). – P. 17995–18011. – DOI:10.1029/2000JD900204.