

## Параметры волновых процессов по данным сети приемников спутниковых навигационных систем

О.Г. Хуторова, В.Е. Хуторов, Г.Е. Корчагин\*

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а

Поступила в редакцию 15.01.2021 г.

Исследованы синоптические пространственно-временные вариации зенитной тропосферной задержки спутниковых радиосигналов в интервале от 3 до 60 сут по данным дистанционного зондирования тропосферы сетью GPS-приемников ГЛОНАСС за 2012–2015 гг. Найдены основные моды синоптических вариаций, построены эмпирические распределения их амплитуд, фазовых скоростей и пространственных масштабов. Найдены сезонные зависимости этих параметров. С помощью независимых данных метеостанций и реанализа ERA5 показано, что вариации зенитной тропосферной задержки радиоволн, интегрального влагосодержания атмосферы, приземного индекса рефракции и скорости ветра в тропосфере определяются одними и теми же синоптическими атмосферными процессами. Наиболее вероятные значения их длин волн не превышают 8 тыс. км.

*Ключевые слова:* ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, волны в атмосфере; GNSS, GLONASS, GPS, waves in the atmosphere.

Волновые процессы синоптических масштабов играют заметную роль в динамике атмосферы и колебаниях ее состава. Анализ циркуляции показал, что планетарные волновые процессы формируют условия блокирования [1, 2], которые способствуют увеличению концентраций метана и углекислого газа [3]. Атмосферные волны синоптического масштаба вносят вклад в пространственную связь изменчивости полей атмосферных параметров, в том числе в изменчивость концентраций малых газовых примесей и аэрозоля в приземном слое [5], в стратосфере [4]. Заметен вклад этих процессов в изменчивость аэрозольной оптической толщи [6], а для атмосферного влагосодержания он составляет не менее 22% общей дисперсии [7]. Волны осуществляют динамическое взаимодействие между разными слоями атмосферы, прежде всего, между тропосферой и стратосферой [8]. Считается, что они способствуют переносу энергии из тропиков в средние и полярные широты [9, 10]. В тропосфере учет синоптических вариаций метеоэлементов – важная часть прогноза погоды [11].

Цель настоящей работы – выявить волновые процессы внутрисезонного масштаба и оценить их пространственные характеристики по данным дистанционного зондирования тропосферы сетью GPS-приемников ГЛОНАСС.

Сеть расположена в Поволжье (Республика Татарстан), приемники пространственно разнесены на расстояния от 55 до 250 км. Зондирование охва-

тывает область 150 км в меридиональном направлении и 250 км – в зональном. Пункты сети ранее использовались для изучения закономерностей интегрального влагосодержания атмосферы, полученного из данных дистанционного зондирования зенитной тропосферной задержки (ZTD) радиосигналов от спутников [12]:

$$ZTD = \int_{\text{приемник}}^{\text{спутник}} N \cdot 10^{-6} dh, \quad (1)$$

где

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2)$$

– индекс рефракции радиоволн в атмосфере. В (2) первое слагаемое определяется влиянием неполярных газов и зависит от вариации плотности атмосферы, а второе – влиянием водного пара;  $p$  – давление воздуха, мбар;  $T$  – температура воздуха, К;  $n$  – коэффициент преломления радиоволн;  $e$  – парциальное давление паров воды, мбар [13, 14].

Обычно из данных дистанционного зондирования получают информацию о водяном паре в тропосфере, исключая слагаемое, вызванное гидростатической частью атмосферы [15]. Однако мы считаем, что для задач исследования волновых процессов больше подходит ZTD, так как из (1) и (2) видно, что изменчивость ZTD отражает смену воздушных масс с учетом изменчивости влажности и плотности атмосферы более корректно, чем интегральное влагосодержание, которое при отрицательных температурах мало.

По данным каждого приемника сети ГЛОНАСС получены длинные ряды ZTD за 2012–2015 гг.

\* Ольга Германовна Хуторова (Olga.Khutorova@krfu.ru); Владислав Евгеньевич Хуторов (pri870@yandex.ru); Геннадий Евгеньевич Корчагин (gkorch@mail.ru).

с временным разрешением 15 мин. При анализе изменчивости нестационарных рядов ZTD с помощью вейвлет-преобразования мы получили в каждом пункте сети динамический спектр квазипериодических вариаций с масштабами 3–60 сут. Вейвлет-спектр, полученный с помощью материнской функции Морле, выделяет квазипериодический сигнал нужного временного масштаба и локализует его амплитуду и фазу во времени [16]. В итоговых вейвлет-спектрах, привязанных к одному периоду времени, выбраны значимые с вероятностью не менее 80% возмущения, выявленные одновременно на всех станциях. Уровень значимости оценивался, согласно [16], по критерию хи-квадрат с использованием модели белого шума.

Далее мы искали когерентные события одинаковых временных масштабов с помощью анализа вейвлет-спектров рядов ZTD в каждом пункте сети станций. Известно, что при наличии периодического процесса его фаза не меняется во времени [17]. Главный критерий отбора периодических вариаций – распределение фазового спектра ZTD для указанного временного масштаба – имеет узкий максимум в течение времени превышения амплитудными спектрами 80%-го уровня значимости. Этим обусловлен высокий (больше 0,95) уровень взаимной когерентности выделенных значимых колебаний. Таким образом устанавливались временные масштабы вариаций, их амплитуды и временная привязка. Доверительный интервал для фазовых спектров, в который попадают ошибки определения фазовых скоростей и длин волн, оценивался согласно [17].

Ранее было показано, что анализ фазового спектра и сеть станций, разнесенных на тысячи километров, позволяют обнаружить проявление планетарных волн низких мод в измерениях аэрозольной оптической толщи солнечными фотометрами даже при наличии промежутков в рядах измерений [18]. Одновременные фазовые спектры, полученные в пространственно-разнесенных пунктах, используются для оценки волновых чисел квазипериодических процессов, определяющих пространственно-временные вариации ZTD с помощью решения уравнения линейной регрессии

$$\varphi = k_x x + k_y y + \varphi_0, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – фазовый вейвлет-спектр данной вариации;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $k_x$ ,  $k_y$  – волновые числа в зональном и меридиональном направлениях;  $x$  – долгота;  $y$  – широта.

Учитывались только те события, в которых линейная регрессия фазы позволяет описывать не менее 70% ее пространственной дисперсии. При таком подходе и расстояниях между станциями меньше, чем размеры исследуемых возмущений, дисперсия волнового пакета практически не влияет на точность определения пространственных характеристик вариаций.

Полученные волновые числа используются для расчета пространственных масштабов волн, их фазовых скоростей  $C_x$  и  $C_y$ . С учетом средней скорости ветра, рассчитанной для каждого момента

времени по данным реанализа ERA5 [19], введена поправка в фазовые скорости волн, чтобы получить их значения относительно среднего потока.

По данным сети ГЛОНАСС за 2012–2015 гг. обнаружено несколько сотен событий вариаций ZTD, удовлетворяющих всем вышеописанным критериям. Спектры всех рядов показали присутствие значимых всплесков интенсивности периодических вариаций в интервале от 3 до 60 сут. Эмпирические распределения амплитуд, периодов, фазовых скоростей и интервалов представлены на рис. 1, 2. Проверка распределений по критерию Пирсона–д’Агостиньо [20] показала, что только компоненты фазовых скоростей можно считать распределенными нормально.

Для верификации результатов проведено сравнение с независимыми данными за 2013 г. Выделялись волновые процессы по данным реанализа ERA5 [19]

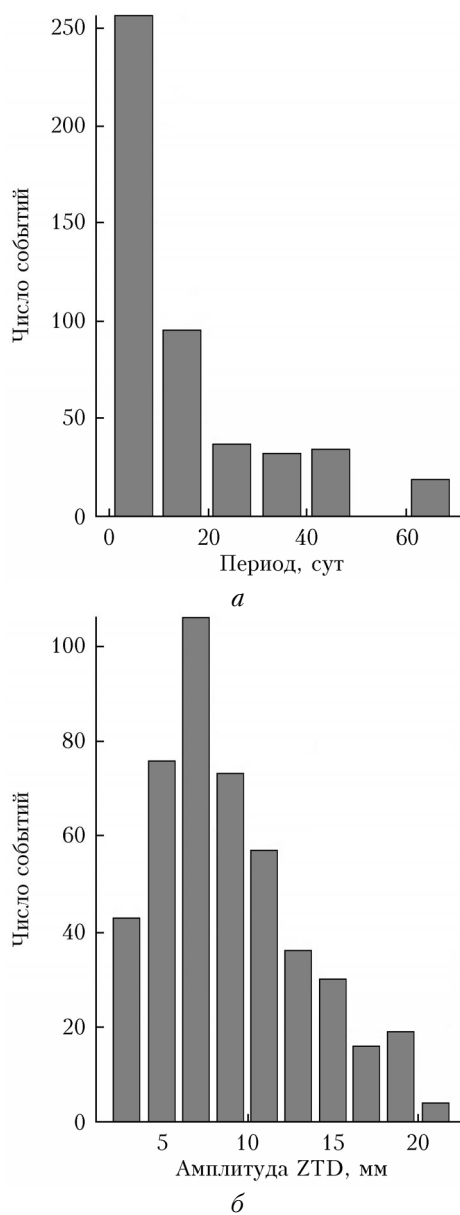


Рис. 1. Эмпирические распределения периодов (а) и амплитуд (б) волновых вариаций ZTD

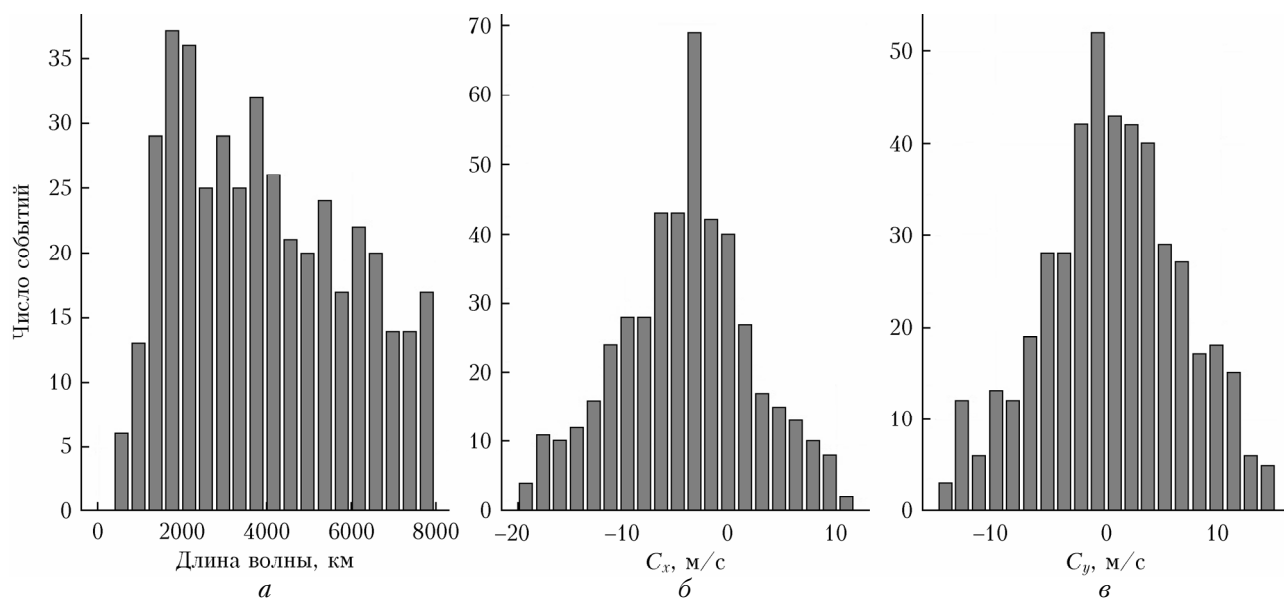


Рис. 2. Эмпирические распределения горизонтальных пространственных масштабов (а), зональных (б) и меридиональных (в) фазовых скоростей волновых процессов, полученных по данным дистанционного зондирования тропосферы

в пространственной области ( $54-7^{\circ}$  с.ш.,  $49-3^{\circ}$  в.д.) в полях интегрального влагосодержания (IWV), зональной и меридиональной скоростей ветра на изобарических уровнях 950, 800 и 500 гПа. По сети метеостанций Росгидромета [21] на той же территории выделялись волновые возмущения в рядах индекса рефракции, рассчитанного согласно (2) по измерениям приземных метеопараметров. На основе данных дистанционного зондирования на сети приемников ГНСС волновые процессы выделялись как в поле ZTD, так и в поле IWV, полученного из значений ZTD [7].

Сравнение показало, что среднее отклонение амплитуд возмущений IWV, выделенных с помощью дистанционного зондирования, от амплитуд, оцененных по данным ERA5, составляет  $0,1 \pm 0,4$  мм осадочной воды. Статистические оценки эмпирических параметров распределений периодов и пространственных размеров волновых возмущений показали, что распределения каждого параметра, полученные по сети станций дистанционного зондирования ZTD, по метеостанциям (приземный индекс рефракции радиоволн) и по данным ERA5 (зональная и меридиональная скорости ветра в тропосфере), принадлежат к одной генеральной совокупности. То есть обнаруженные волновые вариации ZTD определяются волновыми возмущениями синоптического и внутрисезонного масштабов, которые проявляются в изменчивости полей скорости ветра и других атмосферных параметров. Ранее было обнаружено, что когерентность полей атмосферных примесей в значительной степени определяется синоптическими волновыми вариациями скорости ветра и относительной влажности [5].

Большая часть выделенных волновых процессов имеет периоды от 5 до 20 сут (см. рис. 1), которые соответствуют периодам волн Россби [22]. Немногочисленные волны с масштабами 20–60 сут могут быть следствием влияния колебаний Маддена–Джулиана, проникающих в средние широты [9, 23].

Амплитуды волновых вариаций ZTD (см. рис. 1) распределены в диапазоне до 22 мм, наиболее вероятные значения амплитуд – 4–12 мм.

Эмпирическое распределение горизонтальных длин волн (см. рис. 2) показывает, что на этой сети в основном обнаружены волны с пространственными размерами 1500–4000 км. Если предположить глобальную природу этих вариаций, то выделяются лишь высокие моды планетарных волн с зональными волновыми числами более 4, что обусловлено пространственными размерами сети приемников. Распределение зональных фазовых скоростей показывает, что подавляющее количество волновых процессов синоптического масштаба распространяется с востока на запад, также подтверждая гипотезу о том, что это волны Россби [24, 25]. Средняя фазовая скорость обнаруженных вариаций составила 9,2 м/с, стандартное отклонение – 5,4 м/с.

Полученные нами экспериментальные оценки фазовых скоростей по порядку величины согласуются с теоретическими оценками для волн Россби с волновыми числами более 4 [26]. Если учесть работу [27] и факт, что термическая стратификация между экватором и полюсом вдвое уменьшает фазовую скорость коротких волн Россби, а также уменьшает скорость распространения длинных волн Россби в тропосфере в среднем на 20%, то можно выделить специальный тип достаточно коротких волн, связанных с горизонтальной температурной стратификацией, скорость которых относительно зонального потока равна половине скорости классической волны Россби. Обнаруженные в настоящей работе волновые процессы могут участвовать в формировании режимов циркуляции Северного полушария. Известно, например, что волны Россби с зональными волновыми числами 6 и 7 играют роль в блокировании западно-восточного переноса [2]. Также известно, что планетарные волны с волновыми числами 7–10, которые распространяются на восток, существенно

вливают на динамику тропосферы и стратосферы средних широт, обнаружено, что интенсификация стратосферных потеплений сопровождается удлинением их периода [28].

Масштабы и фазовые скорости (см. рис. 2) характерны также для бароклинных волн [29]. Такие волны передают энергию из нижней тропосферы в верхнюю [29], в стратосферу [21], от среднего потока циклонам и антициклонам, в том числе могут сыграть роль в формировании блокирующих антициклонов [30].

В настоящей работе мы построили сезонные зависимости амплитуд вариаций ZTD, длин волн и фазовых скоростей (рис. 3).

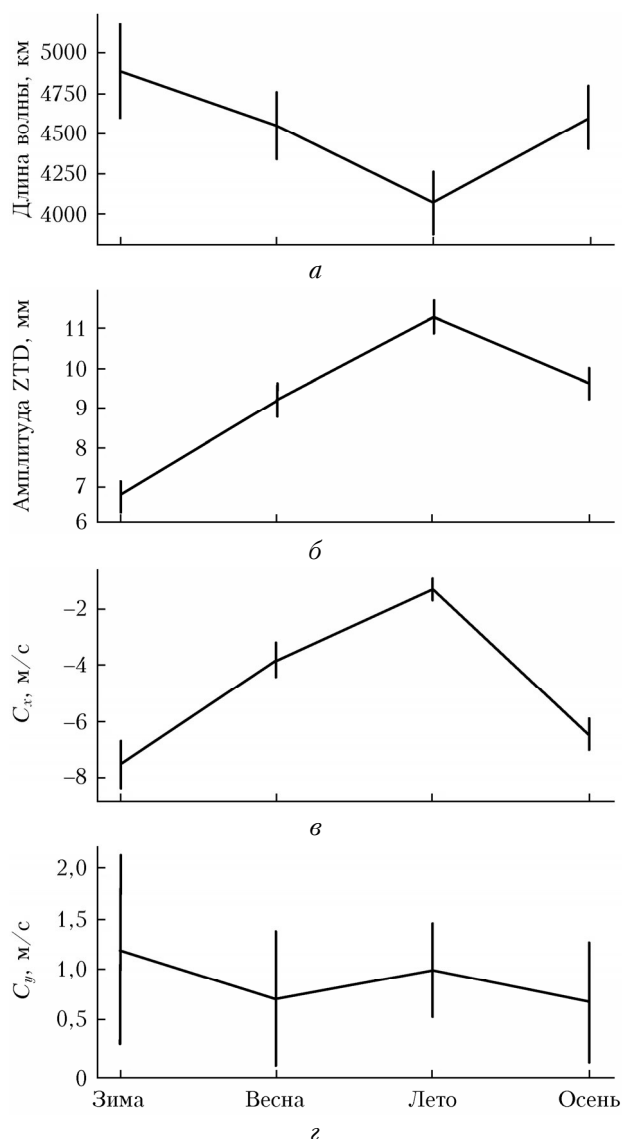


Рис. 3. Сезонные закономерности изменчивости длин волн (а), амплитуд ZTD (б), зональных (в) и меридиональных (г) фазовых скоростей волновых процессов, полученных по данным дистанционного зондирования тропосферы в 2012–2015 гг.

Видно, что в летний период происходит значимое усиление амплитуды волновых вариаций ZTD,

очевидно, связанное с увеличением содержания водяного пара в атмосфере. Летом наблюдается уменьшение средней горизонтальной длины волны на 30% по сравнению с зимним периодом, а также средней зональной фазовой скорости, в то время как меридиональная скорость не показывает значимого сезонного хода. Летом чаще, чем в другие сезоны, обнаруживаются волны с периодами более 20 сут, что, скорее всего, обусловлено проникновением колебаний Маддена–Джулиана из экваториальных широт [23].

В связи тем, что планетарные волны высоких мод очевидно имеют различную природу и, следовательно, их роль в динамике и энергетике атмосферы будет различна, актуально их дальнейшее изучение.

Работы выполнена за счет субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Выражаем благодарность Corenncis Knowledge Base за предоставленный доступ в хранилище климатических данных.

1. Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Девятова Е.В., Мартынова Ю.В. Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть II: Долговременные вариации и их связь с климатической изменчивостью в Азии // Метеорол. и гидрол. 2018. № 3. С. 16–27.
2. Суковатов К.Ю., Безуглова Н.Н. Интерпретация данных об экстремальных погодных явлениях в рамках гипотезы о квазирезонансном механизме формирования блокирующих процессов // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2018. Т. 102, № 4. С. 36–40.
3. Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Фофанов А.В., Sasakawa M., Machida T. Влияние атмосферного блокирования в Западной Сибири на изменение концентрации метана и углекислого газа в зимний период // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 221–227.
4. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56, № 1. С. 102–116.
5. Хуторова О.Г. Взаимосвязь вариаций приземной концентрации атмосферных примесей в двух промышленных регионах Татарстана // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 5–6. С. 526–529.
6. Кабанов Д.М., Курбангалиев Т.Р., Рассказчикова Т.М., Сакерин С.М., Хуторова О.Г. Влияние синоптических факторов на вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 665–674; Kabanov D.M., Kurbangaliev T.R., Rasskazchikova T.M., Sakerin S.M., Khutorova O.G. The influence of synoptic factors on variations of atmospheric aerosol optical depth under Siberian conditions // Atmos. Ocean. Opt. 2011, V. 24, N 6. P. 543–553.
7. Хуторова О.Г., Хуторов В.Е., Тентин Г.М. Межгодовая изменчивость приземного и интегрального влагосодержания на территории Европы и атмосферная циркуляция // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 432–437; Khutorova O.G., Khutorov V.E., Teptin G.M. Interannual variability of surface and integrated water vapor and atmospheric circulation

- in Europe // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 486–491.
8. *Варгин П.Н.* Динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы внетропических широт в период внезапного стратосферного потепления в Арктике в январе-феврале 2017 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 5. С. 5–19.
  9. *Нестеров Е.С.* О влиянии колебания Маддена–Джулиана на циркуляцию атмосферы во внетропических широтах северного полушария // *Гидрометеорол. исследования и прогнозы.* 2018. № 4. С. 63–73.
  10. *Jevrejeva S., Moore J.C., Grinsted A.* Oceanic and atmospheric transport of multiyear El Niño – Southern Oscillation (ENSO) signatures to the polar regions // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N L24210. P. 1–4.
  11. *Holton J.R.* An Introduction to Dynamic Meteorology. Cambridge: Academic Press, 2004. 535 p.
  12. *Kalinnikov V.V., Khutorova O.G.* Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35, N 3. P. 453–464.
  13. *Hofmann-Wellenof B., Lichtenegger H., Collins J.* Global Positioning System. Theory and Practice. Wien – New York: Springer-Verlag, 1994. 356 p.
  14. *Калинников В.В., Хуторова О.Г., Теттин Г.М.* Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2012. Т. 48, № 6. С. 631–638.
  15. *Bevis M., Businger S.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97, N D14. P. 15787–15801.
  16. *Torrence G., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79, N 1. P. 61–78.
  17. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения: в 2 тт. М.: Мир, 1971. Т. 2. 312 с.
  18. *Хуторова О.Г.* Методика исследования влияния планетарных волн на вариации аэрозольной оптической толщины // *Оптика атмосферы и океана.* 2009. Т. 22, № 4 С. 392–396; *Khutorova O.G.* A technique for investigating the effects of planetary waves on aerosol optical thickness variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 2. P. 198–202.
  19. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horanyi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N.* (2018): ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) [Electronic resource]. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview> (last access: 17.12.2019).
  20. *Леман Э.* Проверка статистических гипотез. М.: Наука, 1979. 408 с.
  21. *Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#> описание массива данных (дата обращения: 15.11.2020).
  22. *Madden R.A.* Large-scale, free Rossby waves in the atmosphere – an update // *Tellus.* 2007. V. 59A. P. 571–590.
  23. *Jiang Z., Feldstein S.B., Lee S.* The relationship between the Madden–Julian oscillation and the North Atlantic oscillation // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2017. V. 143, N 702. P. 240–250.
  24. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана: в 2 тт. М.: Мир, 1986. Т. 1. 397 с.
  25. *Монин А.С.* Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
  26. *Dik'y L.A., Golitsyn G.S.* Calculation of the Rossby wave velocities // *Tellus.* 1968. V. 20, N 1. P. 314–317.
  27. *Вульфсон А.Н.* Описание крупномасштабных движений среднего уровня атмосферы и волн Россби в приближении теории конвекции // *Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана,* 1989. Т. 25, № 4. С. 356–366.
  28. *Гурьянов В.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Переведенцев Ю.П.* Волновая активность и ее изменения в тропосфере и стратосфере северного полушария зимой в 1979–2016 г. // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2018. Т. 54, № 2. С. 133–146.
  29. *Chang E.* The structure of baroclinic wave packets // *J. Atmos. Sci.* 2001. V. 58. P. 16941713.
  30. *Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Ганьшин А.В.* Исследование динамических процессов в период формирования и развития блокирующего антициклона над европейской частью России летом 2010 г. // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2012. Т. 48, № 5. С. 537–557.

*O.G. Khutorova, V.E. Khutorov, G.E. Korchagin. Parameters of wave processes from GNSS data.*

Synoptic spatiotemporal variations with 3–60 day periods are studied based on the remote sensing data from the GLONASS GPS receiver network in 2012–2015. The main modes of synoptic variations are found; empirical distributions of their amplitudes, phase velocities, and spatial scales are constructed. The seasonal dependences of these parameters are found. Using independent data from meteorological stations and ERA5 reanalysis, it is shown that variations in radio waves zenith troposphere delay, integral moisture content of the atmosphere, surface refractive index, and wind speed in the troposphere are determined by the same synoptic atmospheric processes. The most probable values of their wavelengths do not exceed 8000 km.