

Методика оценки параметров волновых процессов в тропосфере по данным сети станций ГНСС

О. Г. Хуторова, В. Е. Хуторов

Казанский федеральный университет, Казань, 420008, Россия
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru

В тропосфере учёт синоптических вариаций метеоэлементов составляет важную часть прогноза погоды. Поэтому актуальной задачей представляется разработка методики исследования характеристик синоптических колебаний высоких мод в тропосфере. В работе представлена методика исследования волновых процессов по данным зондирования тропосферы радиосигналами ГНСС в пространственно-разнесённых пунктах. Среди всех технологий, позволяющих зондировать нижнюю атмосферу, применение сигналов спутниковых навигационных систем имеет ряд преимуществ. К ним относится возможность непрерывного суточного мониторинга, высокое временное разрешение измерительных данных, а также относительная дешевизна приёмного оборудования. Показано, что с помощью анализа амплитудного и фазового вейвлет-спектра можно выделять квазипериодические синоптические вариации зенитной тропосферной задержки радиоволн, исследовать их временные и горизонтальные масштабы, фазовые скорости. Методика апробирована на сети приёмников ГНСС в Республике Татарстан. Получены эмпирические распределения пространственных параметров когерентных в пространстве возмущений с периодами от 2 до 60 сут с горизонтальными масштабами до 8000 км. Наиболее вероятные фазовые скорости этих волн находятся в диапазоне от 3 до 12 км/ч. Наиболее вероятные значения длин волн — 1600–4400 км.

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, волны в атмосфере

Одобрена к печати: 09.12.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-210-218

Введение

Колебания атмосферных параметров с временными масштабами от нескольких минут до нескольких недель характерны для всех слоёв атмосферы. Они вызваны волновыми процессами различной природы (Гилл, 1986; Монин, 1969). В теории выделяют волны Россби, волны Кельвина, внутренние гравитационные и смешанные Россби-гравитационные волны (Holton, 2004). Волны осуществляют динамическое взаимодействие между разными слоями атмосферы, прежде всего между тропосферой и стратосферой (Варгин, 2018). Считается, что они способствуют переносу энергии из тропиков в средние и полярные широты (Нестеров, 2018; Jevrejeva et al., 2004). В тропосфере учёт синоптических вариаций метеоэлементов составляет важную часть прогноза погоды. Показано, что атмосферные процессы синоптического масштаба вносят вклад в пространственную связь изменчивости полей атмосферных параметров, в том числе в концентрацию малых газовых примесей и аэрозоля в приземном слое (Хуторова, Тептин, 2003) и в стратосфере (Смышляев и др., 2016). Характеристики планетарных волн меняются вместе с изменением других климатических параметров (Rakushina et al., 2018).

Большая часть исследований волн синоптического временного масштаба посвящена планетарным волнам с малыми зональными волновыми числами. В работе (Madden, 2007) приведены значения параметров волн Россби с волновыми числами от 1 до 4 по оценкам разложения полей реанализа. Считается, что волны с зональными волновыми числами 1–2 в наибольшей степени воздействуют на динамику верхних слоёв атмосферы (Коваль и др., 2018; Rakushina et al., 2018). Однако по данным эксперимента по радиозатменному зондированию атмосферы COSMIC показано, что в спектрах температуры верхней тропосферы и стратосферы проявляются гармоники смешанных Россби-гравитационных волн и волн Кельвина с волновыми числами до 9 (Alexander, 2008). Волны Россби с зональными волновыми чис-

лами 6–7 играют роль в блокировании западно-восточного переноса (Суковатов, Безуглова, 2018). Планетарные волны с волновыми числами 7–10, распространяющиеся на восток в тропосфере и стратосфере средних широт, показывают связь с зимним стратосферным потеплением — интенсификация стратосферных потеплений сопровождается удлинением их периода (Гурьянов и др., 2018).

В связи с вышесказанным представляется актуальной разработка методики исследования характеристик синоптических колебаний высоких мод в тропосфере. Для решения такой задачи могут подойти региональные наземные сети мониторинга. В настоящей работе ставится задача показать возможности исследования волновой структуры тропосферы на примере сети приёмников GPS/ГЛОНАСС (GPS — Global Positioning System, система глобального позиционирования; ГЛОНАСС — Глобальная навигационная спутниковая система) в Республике Татарстан, пространственно-разнесённых на расстояния от 55 до 250 км. Зондирование с помощью этой сети использовалось в работе (Kalinnikov, Khutorova, 2017) для анализа внутрисуточной изменчивости интегрального влагосодержания атмосферы. Зондирование охватывает область 150 км в меридиональном направлении и 250 км — в зональном.

Методика

Среди всех технологий, позволяющих зондировать нижнюю атмосферу, применение сигналов спутниковых навигационных систем имеет ряд преимуществ. К ним относятся возможность непрерывного суточного мониторинга, высокое временное разрешение измерительных данных, а также относительная дешевизна приёмного оборудования (Hofmann-Wellenhof et al., 1994).

Дистанционное зондирование атмосферы в дециметровом диапазоне основано на связи индекса рефракции N и коэффициента преломления n радиоволн с атмосферными параметрами (Bevis, Businger, 1992):

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

где первое слагаемое определяется влиянием неполярных газов, а второе — водяным паром; p и T — давление и температура воздуха в миллибарах и градусах Кельвина соответственно; e — парциальное давление паров воды (мбар).

Динамические процессы в реальной атмосфере формируют неоднородную изменчивую структуру коэффициента преломления. Параметром, характеризующим такое воздействие в тропосфере, может стать вертикальная (зенитная) тропосферная задержка, которая определена через интеграл от индекса рефракции (Hofmann-Wellenhof et al., 1994; Schuler, 2001):

$$ZTD = \int_{H_a}^{H_{\max}} N \times 10^{-6} dh. \quad (2)$$

Интеграл берётся от высоты антенны приёмника H_a до некоторой максимальной высоты H_{\max} (обычно около 100 км). Более высокие слои дают настолько малые значения задержки в нейтральной атмосфере, что они ниже точности измерения. Подставляя выражение (1) в соотношение (2), можно увидеть, что ZTD (*англ.* Zenith Tropospheric Delay, тропосферная задержка радиоволн) представляет собой сумму задержек радиосигнала, вызванных сухими газами и водяным паром. Сейчас популярно направление ГНСС-метеорологии, использующее сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (*англ.* Global Navigation Satellite Systems — GNSS; спутниковая система навигации — ГНСС) для оценки интегрального влагосодержания атмосферы (*англ.* integrated water vapour — IWV) с высоким пространственно-временным разрешением. Все исследования используют один общепризнанный подход, развитый впервые в работе (Bevis, Businger, 1992). Для исследования атмосферных неоднородностей методом радиотомографии используют плотные сети ГНСС-станций (Flores et al., 2000; Kazuro, 2000; Xia et al., 2013). Дистанционное зондирование тропосферы сигналами

ГЛОНАСС и GPS, выполненное сетью пространственно-разнесённых приёмников, позволяет проводить мониторинг зенитной тропосферной задержки и интегрального влагосодержания атмосферы, исследовать их межсуточные и внутрисуточные вариации, характеризующие сезонную, синоптическую, суточную и внутрисуточную динамику тропосферы. Ранее в работе (Хуторова и др., 2018) по данным зондирования сигналами GPS/ГЛОНАСС определены характеристики временных рядов интегрального влагосодержания атмосферы в окрестностях Казани. Показано, что основной вклад в дисперсию вариаций интегрального влагосодержания дают сезонные вариации, он составляет 63 %. Однако значителен и вклад синоптических процессов (22 %), причём их интенсивность меняется год от года, что, возможно, связано с изменчивостью волновой активности.

В настоящей работе для исследования волновых процессов в тропосфере будем использовать зенитную тропосферную задержку радиоволн ZTD, так как она зависит от давления, влажности и температуры, отражает смену воздушных масс, прохождение циклонов и антициклонов. ZTD оценивалась в каждом пункте сети из системы уравнений фазовых измерений одного приёмника ГНСС методом Precise Point Positioning (дословно «позиционирование высокой точности») (Xu, 2007). Для приведения наклонных тропосферных задержек в вертикальные использовалась картирующая функция Нила (Niell, 1996). Система состоит из двойных разностей (спутник – время) ионосферно-свободных комбинаций по видимым синхронно спутникам. Угол отсечки по зенитному гугу составлял 83° . Система решается относительно зенитной тропосферной задержки методом наименьших квадратов, сглаживается от эпохи к эпохе фильтром Калмана, как в работе (Калинников и др., 2013). Временное разрешение полученных рядов ZTD — 5 мин.

Планетарные волны часто выделяют разложением полей метеопараметров на собственные функции (Madden, 2007). Для выделения когерентных в пространстве гармоник часто используется корреляционный анализ временных рядов в разнесённых точках (Куличков и др., 2019; Мордвинов и др., 2013), а также двумерный пространственно-временной спектральный анализ (Hayashi, 1971; Weeler, 1999).

Обычно предполагают, что волновые процессы в атмосфере можно описать периодической функцией во времени и пространстве (Гилл, 1996). Соответственно, мы должны найти во временных рядах ZTD на каждой станции периодический сигнал, фаза которого линейно изменяется в пространстве.

При анализе изменчивости нестационарных рядов ZTD требуется выявить частотное содержание сигнала, локализованное во времени, т. е. узнать, какие периодичности значимы в данный момент времени. Для анализа свойств сигнала одновременно во временном и в частотном пространствах подходит вейвлет-преобразование (Torrence, Compo, 1998). Для задачи спектрального анализа не требуется применения ортогональных базисов, так как в этом случае не ставится задача восстановления сигнала. Поэтому из числа наиболее распространённых и изученных на сегодня вейвлет-функций был выбран вейвлет Морле. Этот комплексный вейвлет позволяет анализировать не только амплитуду, но и фазу вариации, и мы можем сопоставить вейвлет-спектр ZTD спектру атмосферных волн, являющихся собственными колебаниями атмосферы (Torrence, Compo, 1998).

Мы искали когерентные события одинаковых временных масштабов с помощью анализа вейвлет-спектров рядов ZTD в каждом пункте сети станций. Вейвлет-спектр, полученный с помощью материнской функции Морле, выделяет квазипериодический сигнал нужного временного масштаба и локализует его амплитуду и фазу во времени. Известно, что при наличии периодического процесса его фаза не меняется во времени (Дженкинс, Ваттс, 1971). В полученных амплитудных вейвлет-спектрах, привязанных к одному периоду времени, выбраны значимые с вероятностью не менее 80 % возмущения, выявленные одновременно на всех станциях. Уровень значимости оценивался согласно (Torrence, Compo, 1998) по критерию хи-квадрат с использованием модели белого шума. Второй шаг методики основан на том, что распределение фазового спектра ZTD для данного временного масштаба имеет узкий максимум в течение времени превышения амплитудными спектрами 80%-го уровня значимости. Таким образом, устанавливались временные масштабы вариаций, их амплитуды

и временная привязка. Показано, что такой подход и сеть станций, разнесённых на тысячи километров, позволяют обнаружить проявление планетарных волн низких мод в измерениях аэрозольной оптической толщи солнечными фотометрами даже при наличии промежутков в рядах измерений (Хуторова, 2009).

Одновременные фазовые спектры, полученные в пространственно-разнесённых пунктах, позволяют оценить волновые числа квазипериодических процессов, определяющих пространственно-временные вариации ZTD, с помощью решения уравнения линейной регрессии:

$$\varphi = k_x x + k_y y + \varphi_0,$$

где φ — фазовый вейвлет-спектр данной вариации; k_x, k_y — волновые числа в зональном и меридиональном направлении; x — долгота; y — широта. Полученные волновые числа позволяют оценить фазовые скорости перемещения волновых возмущений C и их пространственные размеры.

Доверительный интервал для фазовых спектров, который устанавливает ошибки определения фазовых скоростей и длин волн, оценивался согласно работе (Дженкинс, Ваттс, 1971). Постоянство фазового спектра заранее обуславливает высокий уровень взаимной когерентности выделенных значимых процессов (больше 0,95). Выбираем уровень значимости взаимного фазового спектра не меньше 80 % и сглаживание спектров по времени так, чтобы результирующие ошибки оценки длин волн не превышали 35 %. То есть на данной сети (станции разнесены на 150 км в меридиональном направлении и на 250 км — в зональном) мы можем выделять волны с пространственными масштабами, не превышающими 6800 км в зональном направлении и 4000 км — в меридиональном. Следует подчеркнуть, что расстояния между станциями, меньшие, чем размеры исследуемых возмущений, позволяют оценивать пространственные характеристики в условиях сильной пространственной когерентности волновых процессов. На расстояниях, меньших, чем длина волны, дисперсия волнового пакета практически не влияет на точность определения пространственных характеристик вариаций. Имитационное моделирование показало, что число станций не влияет на вероятность выделения волн, играет роль только размер сети. Этот факт важен, так как в случае перерыва наблюдений на отдельных станциях можно использовать меньшее число пунктов.

Результаты и обсуждение

Был проведён вейвлет-анализ временных рядов ZTD для всех пунктов сети. Спектры всех рядов показали присутствие значимых всплесков интенсивности периодических вариаций с временными масштабами от 3 до 50 сут (см. пример на *рис. 1*, см. с. 214). Для удобства выбран отрезок ряда одной из станций (Казань), вейвлет-спектр представлен в виде сечения, где контуром выделены участки превышения вейвлет-спектром уровня значимости 80 %. Максимумы в амплитудных вейвлет-спектрах, очевидно, указывали, что все выделенные возмущения — квазипериодические, их интенсивность значима с 80%-й вероятностью в течение нескольких периодов для каждой вариации.

По данным сети пунктов за 2013 г. обнаружено несколько сотен событий вариаций ZTD, удовлетворяющих всем критериям значимости и когерентности. Получены гистограммы эмпирических распределений периодов этих вариаций (*рис. 2*, см. с. 214). Большая часть выделенных волновых процессов имеет периоды от 5 до 20 сут, что соответствует периодам волн Россби (Madden, 2007). Немногочисленные волны с масштабами 20–60 сут могут быть следствием влияния колебаний Маддена – Джулиана, проникающих в средние широты (Jiang et al., 2017).

Построена гистограмма распределения горизонтальных длин волн (*рис. 3*, см. с. 214). Полученное распределение показывает, что на данной сети выделяются лишь высокие моды планетарных волн с зональными волновыми числами более 4, наиболее вероятные значения пространственных размеров — 1600–4400 км.

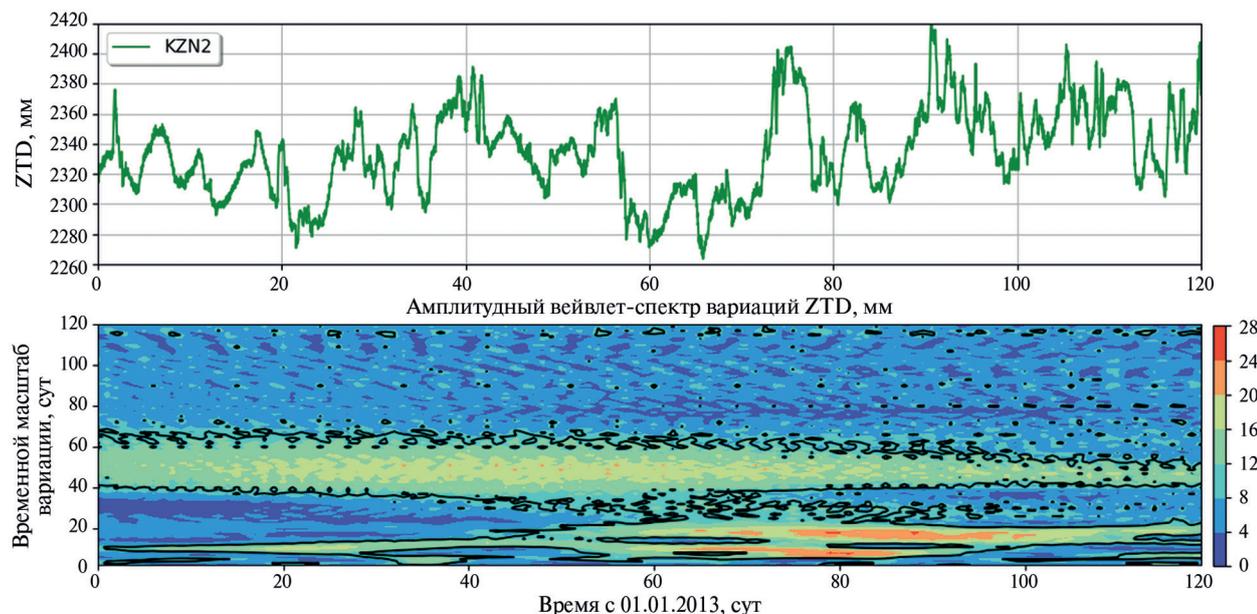


Рис. 1. Ряд зенитной тропосферной задержки станции Казани и его амплитудный вейвлет-спектр в пространстве «время – масштаб гармоник»; контуром выделены участки превышения вейвлет-спектром 80%-го уровня значимости

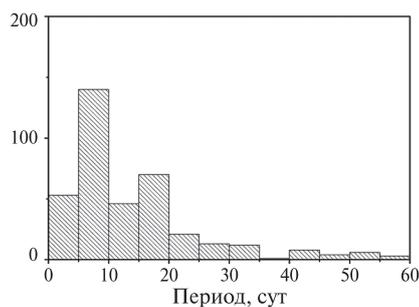


Рис. 2. Гистограмма периодов волновых процессов

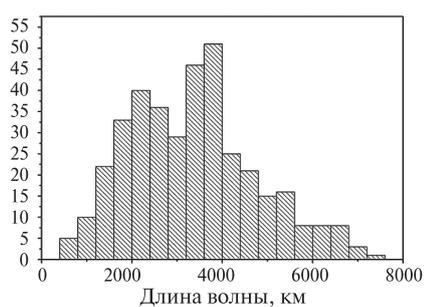


Рис. 3. Гистограммы горизонтальных пространственных масштабов волновых процессов планетарного масштаба

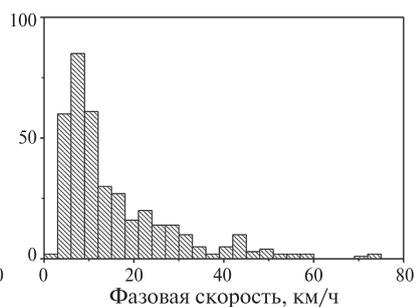


Рис. 4. Гистограммы горизонтальных фазовых скоростей волновых процессов планетарного масштаба

Распределение фазовых скоростей показывает, что наиболее вероятные фазовые скорости планетарных процессов — 3–12 км/ч (рис. 4). Полученные нами экспериментальные результаты по порядку величины согласуются с параметрами волн Россби с волновыми числами более 4 (Dikyu, Golitsyn, 1968). В настоящей работе оценки волны с зональным и меридиональным волновыми числами 6 и 3 соответственно дают скорость 22 км/ч. Если учесть работу (Вульфсон, 1989), то можно принять во внимание факт, что наличие термической стратификации между экватором и полюсом вдвое уменьшает фазовую скорость коротких волн Россби, т.е. в этом случае найденные нами максимальные скорости сопоставимы с теоретическими оценками.

Масштабы и фазовые скорости (см. рис. 2–4) характерны также для бароклинных волн (Chang, 2001). В этой работе по данным реанализа ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) зафиксировано 43 события когерентных волновых пакетов со средним зональным волновым числом 6, средней скоростью 30 км/ч и средней длиной волны 3300 км. Такие волны передают энергии из нижней тропосферы в верхнюю (Chang, 2001), в стратосферу (Варгин, 2018), от среднего потока циклонам и антициклонам, в том числе могут сыграть роль в формировании блокирующих антициклонов (Варгин и др., 2012). Возможно, обнаруженные волновые процессы обусловлены орографией и характерны для

данной местности, так как волны с периодами 2–50 сут, с фазовыми скоростями до 25 км/ч и с пространственными масштабами до 6000 км были обнаружены в полях аэрозоля по данным двух разнесённых пунктов (Хуторова, 2004).

Выводы

В работе показано, что на сети станций с помощью анализа не только амплитудного, но и фазового вейвлет-спектра можно выделять квазипериодические синоптические вариации зенитной тропосферной задержки радиоволн, исследовать их временные и горизонтальные масштабы, фазовые скорости. Методика прошла апробацию на сети станций ГНСС Республики Татарстан. По данным зондирования атмосферы за 2013 г. получены эмпирические распределения пространственных параметров когерентных в пространстве возмущений с горизонтальными масштабами до 8000 км при пространственном размере сети 260×150 км в зональном и меридиональном направлении соответственно. Наиболее вероятные фазовые скорости этих волн находятся в диапазоне от 3 до 12 км/ч. Наиболее вероятные значения длин волн — 1600–4400 км.

Полученные экспериментальные результаты согласуются как с теоретическими (Вульфсон, 1989), так и с экспериментальными (Хуторова, 2004; Chang, 2001) оценками характеристик волновых процессов в тропосфере.

В дальнейшем планируется развитие методики, сравнение с другими независимыми экспериментальными данными о волнах синоптического и субсиноптического масштаба в тропосфере, выявление закономерностей их изменчивости.

Работа выполнена за счёт субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. *Варгин П. Н.* Динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы внетропических широт в период внезапного стратосферного потепления в Арктике в январе – феврале 2017 г. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 5. С. 5–19.
2. *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. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 5. С. 537–557.
3. *Вульфсон А. Н.* Описание крупномасштабных движений среднего уровня атмосферы и волн Россби в приближении теории конвекции // *Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана*. 1989. Т. 25. № 4. С. 356–366.
4. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. Т. 1, 2. М.: Мир, 1986. 396 с., 415 с.
5. *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 гг. // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 2. С. 133–146.
6. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. Т. 1, 2. М.: Мир, 1971. 312 с., 285 с.
7. *Калинников В. В., Хуторова О. Г., Теттин Г. М.* Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 6. С. 631–638.
8. *Коваль А. В., Гаврилов Н. М., Погорельцев А. И., Шевчук Н. О.* Распространение стационарных планетарных волн в верхней атмосфере при разных уровнях солнечной активности // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2018. Т. 58. № 2. С. 295–303.
9. *Куличков С. Н., Чунгузов И. П., Попов О. Е., Перепелкин В. Г., Голикова Е. В., Буш Г. А., Репина И. А., Цыбульская Н. Д., Горчаков Г. И.* Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 мая 2017 г. // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 2. С. 32–40.
10. *Монин А. С.* Прогноз погоды как задача физики. М: Наука, 1969. 184 с.

11. Мордвинов В. И., Девятова Е. В., Кочеткова О. С., Ознобихина О. А. Исследование условий генерации и распространения низкочастотных возмущений в тропосфере // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 1. С. 62–73.
12. Нестеров Е. С. О влиянии колебания Маддена–Джулиана на циркуляцию атмосферы во внетропических широтах северного полушария // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4. С. 63–73.
13. Смышляев С. П., Погорельцев А. И., Галин В. Я. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56. № 1. С. 102–116.
14. 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.
15. Хуторова О. Г. Взаимосвязь вариаций приземной концентрации атмосферных примесей в двух промышленных регионах Татарстана // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 526–529.
16. Хуторова О. Г. Методика исследования влияния планетарных волн на вариации аэрозольной оптической толщины // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 4. С. 392–396.
17. Хуторова О. Г., Тептин Г. М. Временные вариации аэрозоля и малых газовых примесей в приземном городском воздухе // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 782–790.
18. Хуторова О. Г., Хуторов В. Е., Дементьев В. В., Близуриков А. С., Корчагин Г. Е. Изменчивость полей атмосферного влагосодержания по данным зондирования сигналами GPS-ГЛОНАСС в окрестностях г. Казани // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 252–260.
19. Bevis M., Businger S. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. No. D14. P. 15787–15801.
20. Chang E. The Structure of Baroclinic Wave Packets // J. Atmospheric Sciences. 2001. V. 58. P. 1694–1713.
21. Diky L. A., Golitsyn G. S. Calculation of the Rossby wave velocities // Tellus. 1968. V. 20. No. 1. P. 314–317.
22. Flores A., Ruffini G., Rius A. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays // Annals of Geophysics. 2000. V. 18. P. 223–234.
23. Hayashi Y. A generalized method of resolving disturbances into progressive and retrogressive waves by space Fourier and time cross spectral Analyses // J. Meteorological Society of Japan. 1971. V. 49. No. 2. P. 125–128.
24. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. Wien; N. Y.: Springer-Verlag, 1994. 356 p.
25. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Cambridge, MA: Academic Press, 2004. 535 p.
26. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A. Oceanic and atmospheric transport of multiyear El Niño–Southern Oscillation (ENSO) signatures to the polar regions // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31(24). Art. No. L24210. 4 p.
27. Jiang Z., Feldstein S. B., Lee S. The relationship between the Madden–Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2017. V. 143. No. 702. P. 240–250.
28. 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 // Annales Geophysicae. 2017. V. 35. No. 3. С. 453–464.
29. Kazuro H. Local GPS tropospheric tomography // Earth Planets Space. 2000. V. 52. P. 935–939.
30. Madden R. A. Large-scale, free Rossby waves in the atmosphere — an update // Tellus. 2007. V. 59A. P. 571–590.
31. Niell A. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // J. Geophysical Research. 1996. V. 101. No. B2. P. 3227–3246.
32. Rakushina E. V., Ermakova T. S., Pogoreltsev A. I. Changes in the zonal mean flow, temperature, and planetary waves observed in the Northern Hemisphere mid-winter months during the last decades // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. No. 171. P. 234–240.
33. Schuler T. On ground-based GPS tropospheric delay estimation: Doctoral Thesis. Munchen: University of Munchen, 2001. 364 p.
34. Torrence G., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bull. American Meteorological Society. 1998. V. 79. No. 1. P. 61–78.
35. Xia P., Cai Ch., Liu Zh. GNSS troposphere tomography based on two-step reconstructions using GPS observations and COSMIC profiles // Annales Geophysicae. 2013. No. 31. P. 1805–1815.
36. Xu G. GPS. Theory, algorithms and applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.

Methodology for estimating the parameters of wave processes in the troposphere using the data of a network of GNSS stations

O. G. Khutorova, V. E. Khutorov

Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia

E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru

In the troposphere, accounting for synoptic variations in meteorological elements is an important part of weather forecasting. In connection with the above, an urgent task is to develop a technique for studying the characteristics of synoptic oscillations of high modes in the troposphere. The paper presents a technique for studying wave processes based on data from sounding of the troposphere with GNSS radio signals at spatially separated points. Among all the technologies for sounding the lower atmosphere, the use of signals from satellite navigation systems has a number of advantages. These include the possibility of continuous daily monitoring, high time resolution of measurement data, as well as the relative cheapness of receiving equipment. It is shown that by analyzing the amplitude and phase wavelet spectrum, it is possible to single out quasi-periodic synoptic variations in the zenith tropospheric delay of radio waves, to study their time and horizontal scales, and phase velocities. The technique has been tested on a network of GNSS receivers in the Republic of Tatarstan. Empirical distributions of spatial parameters of coherent in space perturbations with periods from 2 to 60 days and horizontal scales up to 8000 km are obtained. The most probable phase velocities of these waves are in the range from 3 to 12 km/h. The most probable wavelengths are 1600–4400 km.

Keywords: GNSS, GLONASS, GPS, ZTD, atmospheric waves

Accepted: 09.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-210-218

References

1. Vargin P. N., Stratosphere-troposphere Dynamical Coupling over Boreal Extratropics during the Sudden Stratospheric Warming in the Arctic in January–February 2017, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, Vol. 43, No. 5, pp. 277–287.
2. Vargin P. N., Luk'yanov A. N., Gan'shin A. V., Investigation of dynamic processes in the period of formation and development of the blocking anticyclone over European Russia in summer 2010, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48, No. 5, pp. 476–495.
3. Wolfson A. N., Opisaniye krupnomasshtabnykh dvizhenii srednego urovnya atmosfery i voln Rossbi v priblizhenii teorii konveksii (Description of large-scale motions of the mean level of the atmosphere and Rossby waves in the approximation of the theory of convection), *Izvestiya AN SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1989, Vol. 25, No. 4, pp. 356–366.
4. Gill A., *Atmosphere-ocean dynamics*, International Geophysics Series, Vol. 30, San Diego; San Francisco; New York; Boston; London; Sydney; Tokyo: Academic Press, 1982, 682 p.
5. Guryanov V. V., Eliseev A. V., Perevedentsev Y. P., Mokhov I. I. Wave activity and its changes in the troposphere and stratosphere of the northern hemisphere in winters of 1979–2016, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 2, pp. 114–126.
6. Jenkins G. M., Watts D. G., *Spectral analysis and its applications*, San Francisco: Holden-Day, 1968, 525 p.
7. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G., Teptin G. M., Ispol'zovanie signalov sputnikovykh navigatsionnykh sistem dlya opredeleniya kharakteristik troposfery (Determination of Troposphere Characteristics Using Signals of Satellite Navigation Systems), *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48, No. 6, pp. 631–638.
8. Koval A. V., Gavrilov N. M., Pogoreltsev A. I., Shevchuk N. O., Rasprostraneniye statsionarnykh planetarnykh voln v verkhnei atmosfere pri raznykh urovnyakh solnechnoi aktivnosti (Propagation of stationary planetary waves in the upper atmosphere at different levels of solar activity), *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, Vol. 58, pp. 281–289.
9. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Perepelkin V. G., Golikova E. V., Bush G. A., Repina I. A., Tsybul'skaya N. D., Gorchakov G. I., Internal Gravity and Infrasound Waves during the Hurricane of May 29, 2017, in Moscow, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, pp. 167–177.
10. Monin A. S., *Prognoz pogody kak zadacha fiziki* (Prediction as the task of physics), Moscow: Nauka, 1969, 184 p.

11. Mordvinov V. I., Devyatova E. V., Kochetkova O. S., Oznobikhina O. A., Investigation of conditions for the generation and propagation of low-frequency disturbances in the troposphere, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 1, pp. 55–65.
12. Nesterov E. S., O vliyaniy kolebaniya Maddena – Dzhuliana na tsirkulyatsiyu atmosfery vo vnetropicheskikh shirotakh severnogo polushariya (The Madden – Julian oscillation effect on atmospheric circulation in the Northern Hemisphere extratropical latitudes), *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2018, No. 4, pp. 63–73.
13. Smyshlyayev S. P., Pogoreltsev A. I., Galin V. Ya., Vliyanie volnovoï aktivnosti na gazovyi sostav stratosfery polyarnykh raionov (Influence of wave activity on the gas composition of the stratosphere of polar regions), *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, Vol. 56, No. 1, pp. 95–109.
14. Sukovatov K. Yu., Bezuglova N. N., Interpretatsiya dannykh ob ekstremal'nykh pogodnykh yavleniyakh v ramkakh gipotezy o kvazirezonsansnom mekhanizme formirovaniya blokiryuyushchikh protsessov (Data Interpretation for Weather Extremes on the Basis of Quasiresonance Hypothesis of Blocking Formation), *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, Vol. 102, No. 4, pp. 36–40.
15. Khutorova O. G., Vzaimosvyaz' variatsii prizemnoi kontsentratsii atmosferynykh primesei v dvukh promyshlennykh regionakh Tatarstana (Relation between variations of the surface concentration of air pollutants in two industrial regions of Tatarstan), *Optika atmosfery i okeana*, 2004, Vol. 17, No. 5–6, pp. 526–529.
16. Khutorova O. G., A Technique for Investigating the Effects of Planetary Waves on Aerosol Optical Thickness Variations, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2009, Vol. 22, No. 2, pp. 198–202.
17. Khutorova O. G., Teptin G. M., Time variations in aerosol and minor gaseous impurities in the urban surface air, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2003, Vol. 39, No. 6, pp. 705–713.
18. Khutorova O. G., Khutorov V. E., Dementiev V. V., Blizorukov A. S., Korchagin G. E., Izmenchivost' polei atmosfernogo vlagosoderzhaniya po dannym zondirovaniya signalami GPS-GLONASS v okrestnostyakh g. Kazani (Atmospheric moisture content variability from GPS-GLONASS data near the Kazan city), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 252–260.
19. Bevis M., Businger S., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, No. D14, pp. 15787–15801.
20. Chang E., The Structure of Baroclinic Wave Packets, *J. Atmospheric Sciences*, 2001, Vol. 58, pp. 1694–1713.
21. Diky L. A., Golitsyn G. S., Calculation of the Rossby wave velocities, *Tellus*, 1968, Vol. 20, No. 1, pp. 314–317.
22. Flores A., Ruffini G., Rius A., 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays, *Annals of Geophysics*, 2000, Vol. 18, pp. 223–234.
23. Hayashi Y., A generalized method of resolving disturbances into progressive and retrogressive waves by space Fourier and time cross spectral Analyses, *J. Meteorological Society of Japan*, 1971, Vol. 49, No. 2, pp. 125–128.
24. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System, Theory and Practice*, Wien; New York: Springer-Verlag, 1994, 356 p.
25. Holton J. R., *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Cambridge, MA: Academic Press, 2004, 535 p.
26. Jevrejeva S., Moore J. C., Grinsted A., Oceanic and atmospheric transport of multiyear El Niño–Southern Oscillation (ENSO) signatures to the polar regions, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31(24), Art. No. L24210, 4 p.
27. Jiang Z., Feldstein S. B., Lee S., The relationship between the Madden – Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2017, Vol. 143, No. 702, pp. 240–250.
28. Kalinnikov V. V., Khutorova O., Durinal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga-Ural region of Russia, *Annales Geophysicae*, 2017, Vol. 35, No. 3, pp. 453–464.
29. Kazuro H., Local GPS tropospheric tomography, *Earth Planets Space*, 2000, Vol. 52, pp. 935–939.
30. Madden R. A., Large-scale, free Rossby waves in the atmosphere – an update, *Tellus*, 2007, Vol. 59A, pp. 571–590.
31. Niell A., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophysical Research*, 1996, Vol. 101, No. B2, pp. 3227–3246.
32. Rakushina E. V., Ermakova T. S., Pogoreltsev A. I., Changes in the zonal mean flow, temperature, and planetary waves observed in the Northern Hemisphere mid-winter months during the last decades, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, No. 171, pp. 234–240.
33. Schuler T., *On ground-based GPS tropospheric delay estimation: Doctoral Thesis*, Munchen: University of Munchen, 2001, 364 p.
34. Torrence G., Compo G. P., A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. American Meteorological Society*, 1998, Vol. 79, No. 1, pp. 61–78.
35. Xia P., Cai Ch., Liu Zh., GNSS troposphere tomography based on two-step reconstructions using GPS observations and COSMIC profiles, *Annales Geophysicae*, 2013, No. 31, pp. 1805–1815.
36. Xu G., *GPS. Theory, algorithms and applications*, Berlin: Springer, 2007, 340 p.