

Мониторинг влагосодержания в атмосфере над территорией Ленинградской и смежных областей с помощью ГНСС

© В. Л. Горшков¹, А. С. Гришина², Н. В. Щербакова¹

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

На территории Ленинградской и смежных с нею областей в период 2016–2018 гг. по данным 65 ГНСС-станций исследована динамика интегрального влагосодержания в атмосфере (IPWV, integrated precipitable water vapor). Оценки IPWV хорошо согласуются с измерениями, полученными при радиозондировании в трёх пунктах обозначенного региона. Построены карты динамики поля IPWV для исследуемого района с временной развёрткой 5 мин и 6 ч. По продолжительным наблюдениям в регионе оценены трендовые составляющие IPWV и спектральный состав ее вариаций.

Ключевые слова: ГНСС, тропосферная задержка, радиозондирование атмосферы, динамика влагосодержания в атмосфере.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.49.23-31>

Введение

Аэрологические наблюдения и зондирование приземного слоя атмосферы с помощью космических аппаратов не позволяют проводить мониторинг атмосферных мезомасштабных процессов с высоким временным разрешением. Этот пробел позволяют заполнить ГНСС-наблюдения, обеспечивая непрерывный высокоточный мониторинг атмосферного влагосодержания [1].

Точные данные о временном и пространственном распределении влагосодержания важны для численного моделирования погодных условий и изучения климата [2]. Также оценка IPWV важна в астрономической практике при работе в ИК-диапазоне и для учёта рефракционных поправок в наблюдениях [3].

Из всех параметров тропосферы водяной пар является самым переменным, именно поэтому результаты мониторинга должны обеспечивать высокое временное и пространственное разрешение. В этом плане мониторинг содержания водяного пара с помощью ГНСС-сигналов обладает существенными преимуществами по сравнению с работой редко расположенных станций, которые оснащены средствами радиозондирования, радиометрами водяного пара и солнечными фотометрами. Кроме того, в отличие от вышеперечисленных методов, ГНСС-мониторинг IPWV характеризуется высокой точностью, всепогодностью и стабильностью данных, которая обусловлена независимостью от калибровки датчиков.

Данные о динамике IPWP востребованы при решении многих научных и прикладных задач. Поэтому некоторые международные аналитические центры по обработке данных ГНСС-сетей предоставляют для каждой станции результаты не только о вариациях координат, но и о влагосодержании. К сожалению, даже в европейской части России количество ГНСС-станций со свободным доступом к данным недостаточно для решения обозначенных выше задач.

В работе исследована динамика атмосферного влагосодержания в разных временных масштабах для Ленинградской области и прилегающих к ней территорий. Этот регион является наиболее плотно заполненной частью сети станций, обработка которых поддерживается авторами в виде свободно доступной в Интернете базы ГНСС-данных на территории Восточно-Европейской платформы (http://www.gaoran.ru/russian/database/station/databasev_rus.html).

Метод и использованные данные

В данном исследовании для обработки ГНСС-сигналов использовался пакет GIPSY 6.4 (JPL). Один из оцениваемых параметров в этом пакете — задержка ГНСС-сигнала при распространении от спутника до приёмника через нейтральную атмосферу, вычисляемая каждые 5 мин. Для приведения её к зениту была применена картирующая функция VMF1 [4].

Основной вклад в получаемую таким образом зенитную тропосферную задержку ZTD (zenith troposphere delay) вносит гидростатическая составляющая ZHD (zenith hydrostatic delay), для оценки которой в пакете используется модель Саастамойнена. Их разность ZWD = ZTD – ZHD представляет влажную тропосферную задержку. Зная поверхностную температуру воздуха в месте расположения ГНСС-станции, можно вычислить среднюю температуру атмосферы T_m . Таким образом, согласно [5] искомая оценка IPWV = ZWD / (0.10631 + 1733 / T_m). Для оценки T_m авторы использовали несколько моделей: модель, приведённую в [6], — для пунктов, расположенных близко к исследуемому региону, модель, полученную по данным температурного профилемера МТР-5 в обсерватории «Светлое», а также глобальную модель Мендеса. Модели были применены для обработки данных ГНСС-станции в Пулково в 2017 г. Разброс оценок IPWV оказался менее 1 мм, и поэтому для обработки всего материала была использована модель Мендеса, выведенная по глобальным данным радиозондирования.

Аналогичный подход с использованием тех же моделей был применен в работе [7] при исследовании IPWV по обработке сигналов сети ГНСС-станций на территории Республики Татарстан в 2011–2015 гг.

На рис. 1 приведена карта расположения ГНСС и метеорологических станций, использованных в работе. Только для 14 из 65 ГНСС-станций поблизости (в пределах 20 км) имеются метеостанции. Для этих 14 пунктов было произведено сравнение IPWV, вычисленных с использованием архивных метеоданных ближайших метеостанций (<https://rp5.ru>), с IPWV, рассчитанных с помощью геопространственной интерполяции по сетке 2.5×2.5° глобальной численной модели метеорологических полей NCEP/NCAR Reanalysis-1 с временным разрешением 6 час. За период 2017–2018 гг. средняя разность соответствующих

оценок IPWV по этим 14 станциям ничтожна (0.01 ± 3.8 мм), но для некоторых станций её вариации в летний период достигают 20 мм. Поэтому для обработки данных всех станций были использованы результаты глобальной численной модели Reanalysis-1 с пространственно-временной интерполяцией для каждой станции на моменты наблюдения.

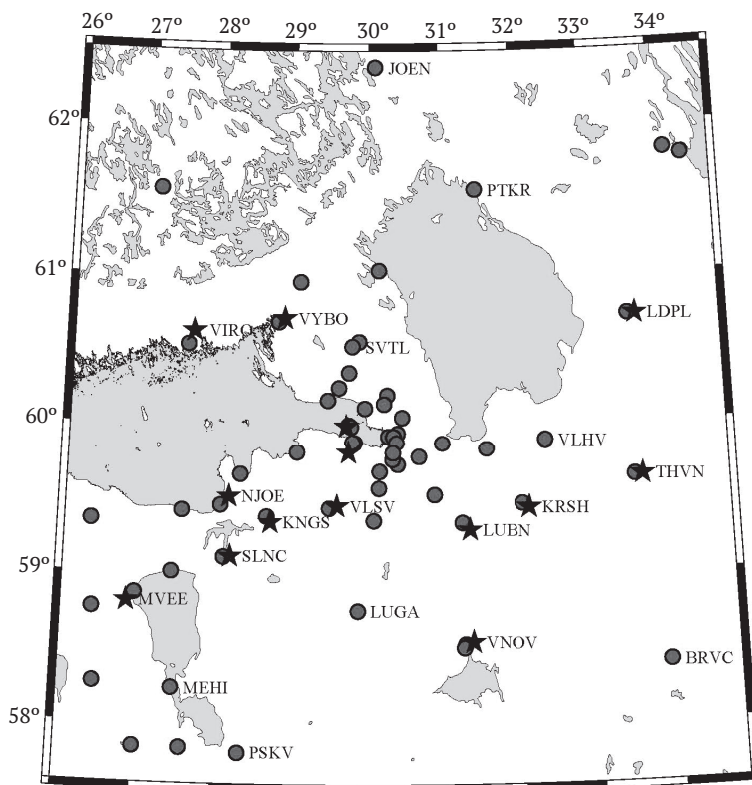


Рис. 1. Карта ГНСС (кружки) и метеорологических станций (звёздочки) региона

Для использования IPWV в целях прогнозирования погоды имеет значение оперативность их определения. Основной фактор, снижающий оперативность получения оценок IPWV, — использование окончательных орбитальных параметров (*final*), вычисляемых соответствующими службами аналитических центров ГНСС с задержкой не менее 10 сут. Вычисляются также срочные и сверхсрочные орбиты с задержкой 1–2 ч (*ultra rapid*). Авторами исследовано влияние на определение IPWV орбитальных параметров, вычисленных как по окончательным, так и по сверхсрочным орбитам для летнего сезона 2017 г. на станциях в Пулкове и в Светлом. Размах полученных разностей ($IPWV_{FINAL} - IPWV_{ULTRA_RAPID}$) для обеих станций не превышал на этом интервале 0.6 мм без видимой систематики в них. Не было обнаружено также и заметных (более 0.5 мм) систематических расхождений при изменении высотной отсечки спутников (5° и 10° над горизонтом) для тех же станций. Следовательно, IPWV можно вычислять в режиме мониторинга, используя станции с различным оборудованием и настройками.

Сравнение с другими средствами определения IPWV

Оценки $IPWV_{ГНСС}$, полученные по ГНСС-сигналам, сравнивались с данными радиозондирования атмосферы $IPWV_{PЗ}$ на станциях в Воейково (28 км до ГНСС-станции), в Великих Луках (4 км) и в Петрозаводске (4 км). Используемые для сравнения станции радиозондирования являются единственными в окрестностях исследуемого региона. На рис. 2 приведены результаты сравнения соответствующих оценок IPWV. В среднем данные радиозондирования дают завышенные на 1–2 мм значения IPWV относительно ГНСС-данных. Заметно увеличивается разброс сравниваемых величин в летний период, когда возрастает вариабельность самой величины IPWV.

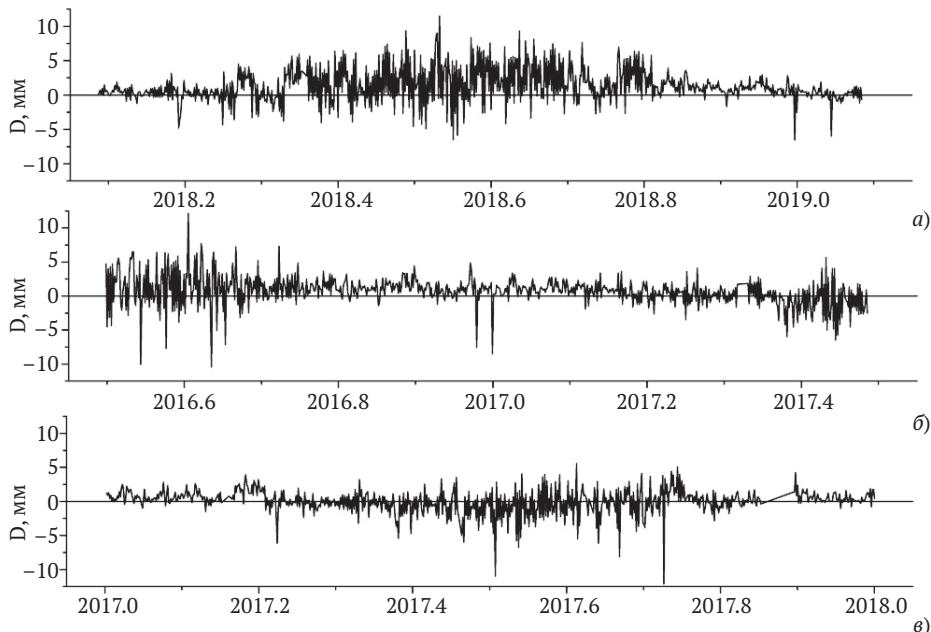


Рис. 2. Сравнение оценок влагосодержания $D = IPWV_{PЗ} - IPWV_{ГНСС}$ для станций: а) Великие Луки; б) Воейково-Пулково; в) Петрозаводск

На рис. 3 приведено для станции в Пулково сравнение оценок IPWV, вычисленных по ГНСС-сигналам и интерполированных по данным Reanalysis-1, в свою очередь, представляющих глобальную модель этого параметра, в основном построенную по данным радиозондирования. Разности представлены на каждые 6 ч в соответствии с временной сеткой данных метеополей Reanalysis-1. Из рис. 3 видно, что смена оборудования на станции никак не влияет на характер вариаций. Средняя величина разности $\Delta IPWV = 1.4 \pm 2.0$ мм и характер ее вариаций примерно соответствует данным, приведённым на рис. 2. Похожее систематические расхождения отмечаются во многих подобных работах, и это является проблемой, требующей более детального исследования.

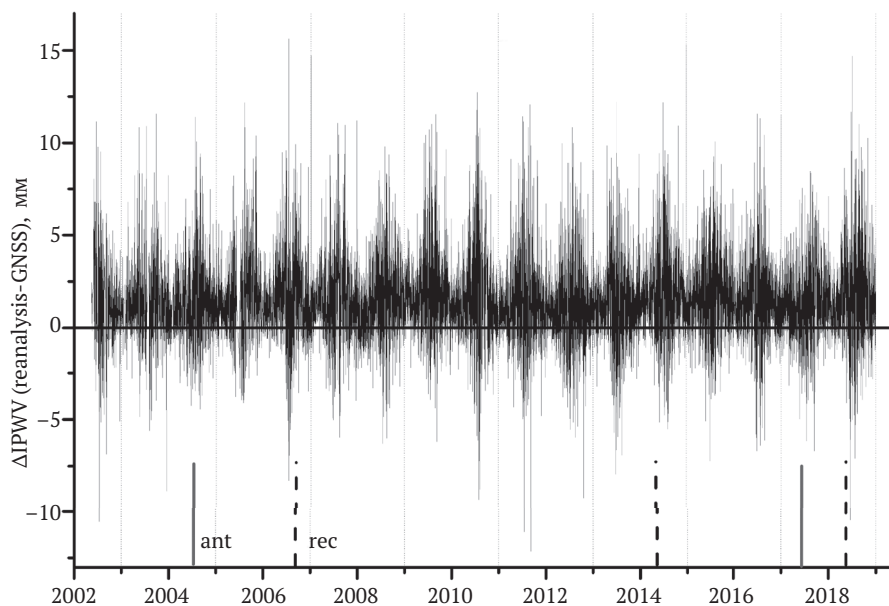


Рис. 3. Вариации разности $\Delta IPWV$; вертикальными линиями отмечены моменты смены оборудования на ГНСС-станции PULK

Отметим, что оценки влагосодержания, полученные радиозондами путём интегрирования профиля абсолютной влажности в вертикальном направлении, отягощены зависящими от времени и пространства ошибками сенсора и систематическими ошибками от солнечной радиации. Соответствующие ошибки в измерении ZWD достигают 0.5–3.0 мм.

Результаты

Долговременные вариации IPWV

Для исследования долговременных вариаций IPWV использовались все ряды из имеющейся базы данных (не только региона Ленинградской области) за период более 18 лет (31 ряд) с временным разрешением 6 ч, соответствующим разрешению численной модели метеорологических полей Reanalysis-1. Средняя внутренняя, вычисляемая пакетом GIPSY ошибка этих рядов составила $\sigma = 1.4$ мм, а величина вариаций Аллана, в большей степени отражающая реальную шумовую составляющую рядов, $\sigma_A = 6.5$ мм. Для примера на рис. 4 приведены вариации IPWV на станции METS (Финляндия) за весь период наблюдений и для станции PULK вариации ZWD и её ошибки за 2017 г. Видно, что сезонная составляющая является доминирующей, как и на всех других станциях сети. В летний период возрастает амплитуда как самих вариаций IPWV, так и разность их значений для близлежащих станций.

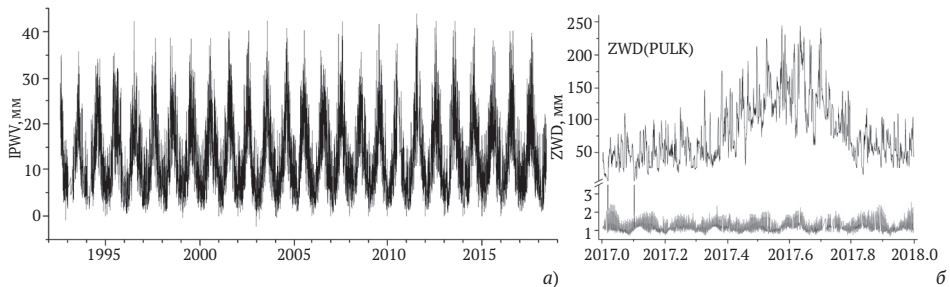


Рис. 4. а) вариации IPWV для ГНСС-станции METS;
б) вариации ZWD и её ошибки (внизу) для станции PULK

С помощью многоканального спектрального анализа [8] по 22 рядам с продолжительностью более 22 лет с еженедельным осреднением были выделены общие низкочастотные составляющие их спектров, наиболее значимыми из которых помимо годичной и тренда были следующие: 0.8 года с амплитудой 0.4 мм, 1.2 года — 0.5 мм и 5.4 года — 0.3 мм. Линейная аппроксимация тренда в среднем для всех станций составила 0.34 ± 0.006 мм/10 лет, что очень близко совпадает с результатами из работы [9] по тренду влагосодержания над мировым океаном (0.33 мм/10 лет). Заметно незначительное увеличение тренда в направлении южных станций.

Вариации IPWV с разрешением 5 мин

В спектре вариаций, вычисленном аналогичным образом, для избранного летнего сезона 2017 г. выделяются синоптические вариации IPWV (3–4 и 7–14 дней) с амплитудами около 3 мм при средней ошибке 0.5–2 мм. Суточные вариации с амплитудой до 2 мм выделяются хуже. Вариации Аллана для этих рядов составляют 0.53 мм.

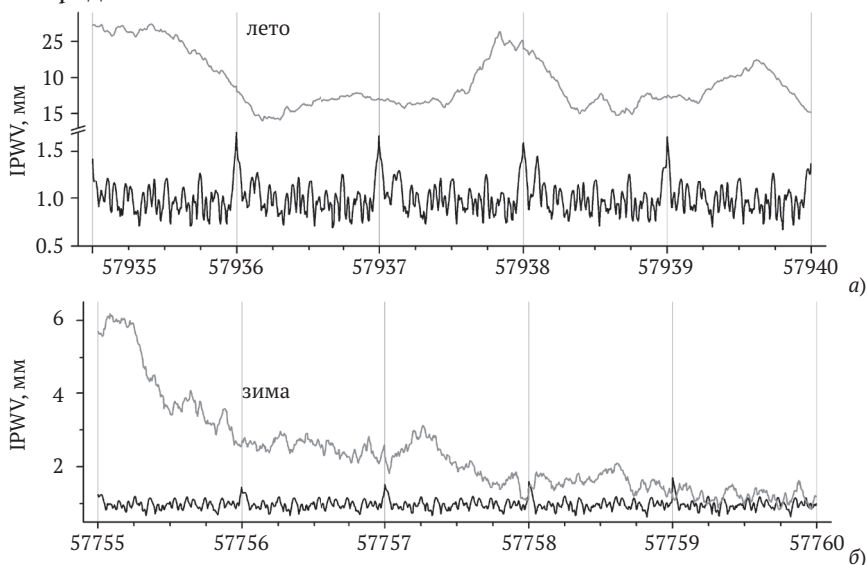


Рис. 5. а) вариации IPWV на станции RSCH и б) их ошибки

На рис. 5 для примера представлены вариации IPWV с 5-минутным разрешением для станции RSCH в летний (вариации температуры от 13 до 27°C) и зимний (температура падала от -5 до -31°C) периоды. Заметна особенность поведения ошибок в виде импульсных всплесков в начале каждых суток, что характерно также для определяемых с помощью GIPSY положений станций.

Пространственно-временные вариации IPWV

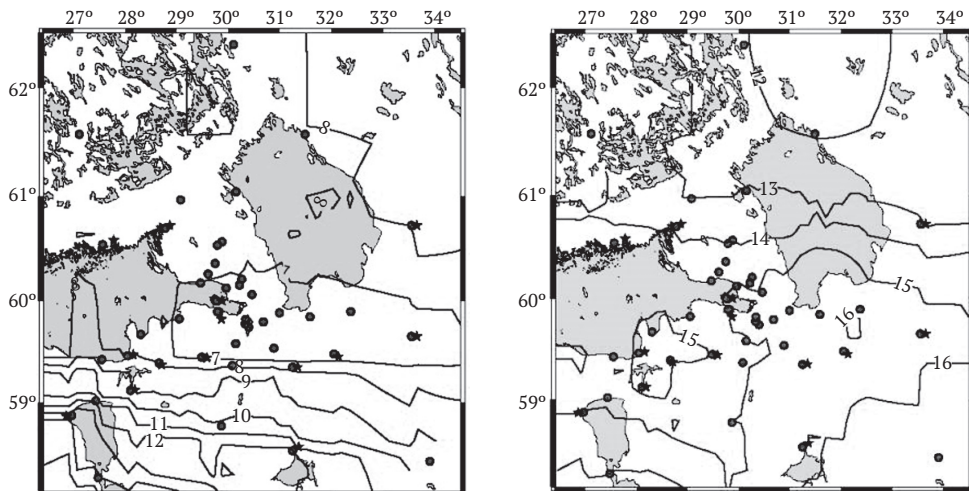


Рис. 6. Изолинии поля IPWV (мм) на территории исследуемого региона для 1.01.2017 и 22.06.2017

Для всех 65 станции исследуемого региона были вычислены значения IPWV как с 6-часовым разрешением на протяжении 2017–2018 гг., так и для избранных летних и зимних интервалов 2017 г. с 5-минутным разрешением.

По этим данным для каждого 6-часового интервала были построены карты изолиний IPWV (рис. 6), использованные затем для видеомонтажа динамических вариаций поля влагосодержания. Существуют разные возможности для построения полей геоданных на регулярной географической сетке по полю случайно распределённых исходных пунктов наблюдений этих данных. Для геопространственной интерполяции IPWV в данной работе использовались интерполяционная сетка 10' и радиус осреднения (масштабный фактор) 100 км с 4-секторным разбиением; при этом значение IPWV в интерполируемой точке считалось значимым, если как минимум в двух секторах присутствовали ГНСС-станции.

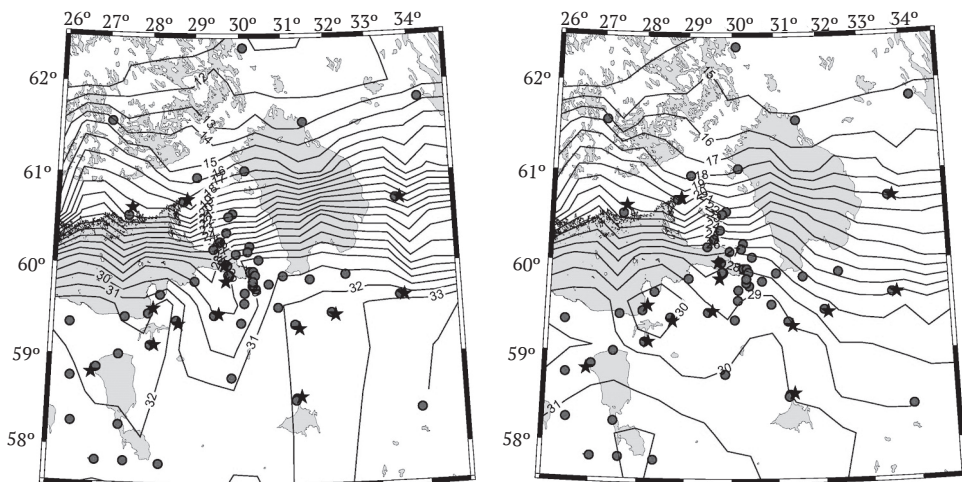


Рис. 7. Изолинии поля IPWV для 0 ч и 12 ч UT 1 июля 2017 г.

Характер динамических вариаций IPWV при таком временном разрешении и такой развертке оказался очень грубым и скачкообразным, особенно в летний период. Поэтому для динамических исследований влагосодержания следует использовать более детальное временное разрешение, что и было сделано для избранных интервалов с 5-минутным разрешением. На рис. 7 представлены изолинии IPWV для одного летнего дня региона. К сожалению, при выходе из строя или временном отсутствии данных на какой-либо ГНСС-станции картина кадра изолиний региона может резко меняться, что требует разработки соответствующих методов, компенсирующих это эффект.

Заключение

По данным 65 ГНСС-станций на территории, окружающей Финский залив и Ладожское озеро, определена динамика содержания водяного пара в тропосфере с разным временным разрешением. Получены соответствующие спектральные оценки.

Сравнение результатов ГНСС-мониторинга водяного пара с данными радиозондирования атмосферы не обнаруживают значимых расхождений, но превосходят последние в пространственно-временном разрешении.

По данным 31 станции с продолжительными наблюдениями (более 20 лет) оценено нарастание содержания водяного пара, составляющее в среднем 0.34 мм/10 лет.

Благодарности

Мы благодарны коллегам российских коммерческих геодезических предприятий «Геоматик» (34 станции), соответствующего подразделения КГА СПб (10 станций) и «ГеоСтройИзыскания» (3 станции) за предоставление доступа к данным их ГНСС-сетей, а также всем отечественным и зарубежным коллегам, чей ресурс находится в открытом доступе (PKC, СПбГУ, IGS, EPN, EstPos).

Литература

1. *Bevis M. S., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., Ware R. H.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // *J. Geophys. Res.* — 1992. — Vol. 97. — P. 15787–15801.
2. *Khutorova O. G., Teptin G. M., Khutorov V. E., Kalinnikov V. V., Kurbangaliev T. R.* Variability of GPS-derived zenith tropospheric delay and some result of its assimilation into numeric atmosphere model // *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS).* — 2012. — P. 940–943.
3. *Возякова О. В.* Прозрачность атмосферы над горой Шатджатмаз в оптическом и ближнем ИК-диапазоне // *Письма в Астрон. журн.* — 2012. — Т. 38, №4. — С. 307–315.
4. *Boehm J., Werl B., Schuh H.* Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from European centre for medium-range weather forecasts operational analysis data // *J. Geophys. Res.* — 2006. — Vol. 111. — P. B02406.
5. *Хуторова О. Г.* Зондирование атмосферы и ионосферы радиосигналами спутниковых навигационных систем. Учебное пособие. — Казань, 2011. — 117 с.
6. *Чукин В. В., Алдошкина Е. С., Вахнин А. В., Канухина А. Ю., Мельникова О. А.* Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС-сигналами // *Учебные записки РГТМУ.* — 2010. — №12. — С. 50–59.
7. *Хуторова О. Г., Хуторов В. Е., Дементьев В. В., Близоруков 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.
8. *Goliandina N., Zhigljavsky A.* Singular Spectrum Analysis for Time Series. — Springer, 2013. — 120 p.
9. *Ross R. J., Elliott W. P.* Radiosonde based northern hemisphere tropospheric water vapor trends // *J. Climate.* — 2001. — Vol. 14. — P. 1602–1612.

GNSS Monitoring of the Atmospheric Water Vapour over the Leningrad and Neighbouring Regions

V. L. Gorshkov, A. S. Grishina, N. V. Scherbakova

The dynamics of the atmospheric integrated precipitable water vapor (IPWV) over the Leningrad and adjacent regions have been investigated according to the GNSS database which is maintained at the Pulkovo Observatory. The data of 65 GNSS-stations are used for this study. The mean atmospheric temperature that is required for the IPWV estimation has been calculated both using the surface temperature figures from the nearest meteorological stations and interpolating the data from the global atmospheric database NCEP/NCAR Reanalysis-1. The GNSS IPWV estimations are compared with the data obtained from the local radiosondes and the water vapour radiometer in the Svetloe Observatory. All the data obtained are in good agreement. The IPWV spatial distribution temporal dynamic maps are made for the studied region. The trends of the IPWV (0.34 ± 0.006 mm/10 year) have been estimated as a result of 31 longest GNSS series in this area.

Keywords: GNSS, tropospheric delay, atmospheric radio sounding, dynamics of the integrated precipitable water vapour.