



Динамика атмосферного влагосодержания по ГНСС-наблюдениям над территорией Восточно-Европейской платформы

В.Л. Горшков^{1*}, Н.В. Щербакова¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 20 апреля 2024 / Принята к публикации 3 мая 2024

Аннотация

По ГНСС-данным поддерживаемой в Пулковской обсерватории базы (VDB) и аналогичной базы Геодезической Лаборатории Невады (NGL, США) исследована многолетняя динамика влагосодержания в атмосфере над территорией Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Тренд атмосферного влагосодержания составляет 0.03 мм/год.

ключевые слова: ГНСС базы данных, тропосферные задержки в ГНСС наблюдениях, атмосферное влагосодержание

Введение

ГНСС-технологии являются одним из самых эффективных методов мониторинга и исследования интегрального влагосодержания атмосферы. Интегральное влагосодержание это масса водяного пара в атмосферном столбе единичной площади сечения, выражаемая в миллиметрах высоты столба жидкой воды, который образовался бы при конденсации этой массы водяного пара (PW - Precipitable Water). Водяной пар является важнейшей составляющей парникового газа. Его вклад составляет около 70% всех парниковых газов планеты. На долю водяного пара приходится основная часть поглощенной радиации, что и обеспечивает его доминирующий вклад в атмосферный перенос больших количеств энергии. Как было отмечено в работе [Горшков и др. \(2019\)](#), мониторинг PW с помощью ГНСС-наблюдений всепогоден, не зависит от калибровки и может производиться с любым временным и пространственным разрешением, что выгодно отличает данный метод от аналогичных данных радиометров и солнечных фотометров. Данные мониторинга PW важны при построении погодных и климатических моделей в метеорологии ввиду положительной обратной связи между температурой и влагосодержанием атмосферы. В этой связи интересны долговременные вариации PW, которые исследуются в данной работе. В астрономической практике оценка PW также важна для учёта рефракционных поправок, особенно при наблюдении в ИК диапазоне.

1 Метод определения влагосодержания

Зенитная задержка нейтральной атмосферы - стандартный продукт обработки ГНСС-данных на каждой станции пакетом Gipsy. Задержка ГНСС-сигнала при распространении через нейтральную атмосферу приводится к зениту с помощью картирующей функции (в Gipsy используется функция Мендеса), зависящей от многих параметров (высоты спутника над горизонтом, атмосферного давления и т.д.), и называется тропосферной зенитной задержкой *ZTD*. В

*e-mail: vigor1946@yandex.ru

свою очередь ZTD складывается из гидростатической (ZHD) и влажной (ZWD) составляющих: $ZTD = ZHD + ZWD$. Составляющая ZHD моделируется поверхностными барометрическими измерениями в месте приема сигнала. При обработке в пакете Gipsy используется модель Саастамойнена, являющаяся следствием уравнения статики атмосферы:

$$ZHD = 0.22767Ps / (1 - 0.00266\cos(2B) - 0.00028H), \quad (1)$$

где B , H – широта и высота ГНСС-станции, Ps – поверхностное давление. Величина $ZWD = ZTD - ZHD$ в пункте наблюдения зависит от содержания атмосферного водяного пара в тропосфере и позволяет выявить количество осаждаемой воды (Mendes (1999)):

$$PW = ZWD / (0.10631 + 1733/Tm), \quad (2)$$

где $Tm = 65.48 + 0.73Ts$ – средняя температура столба тропосферы, Ts – поверхностная температура. Из многочисленных аппроксимаций Tm выбрана аппроксимация по работе Чукин и др. (2010). Как видно из формулы (2), PW слабо зависит от сезонных колебаний Ts , поэтому для качественного анализа вариаций водяного пара в атмосфере зачастую достаточно изучать поведение ZWD . Величины Ps и Ts интерполируются по глобальной численной модели метеорологических полей NCEP/NCAR Reanalysis (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>).

2 Данные

В этой работе, также как в Горшков и др. (2024), помимо данных из нашей базы (VDB, http://www.gaoran.ru/russian/database/station/database_rus.html) для расширения возможностей исследования привлечён материал сходной базы из Геологической лаборатории университета Невады (NGL, <http://geodesy.unr.edu/>), где также приводятся данные о тропосферных задержках на каждые 5 минут, усреднённые нами на суточных интервалах. Ошибки, приводимые пакетом Gipsy для каждой такой точки PW , составляют, как правило, менее 0.5 мм. На рис.1 для примера приведены вариации PW для станции ONSA, наблюдения на которой продолжались 30 лет.

Видно, что остаточные вариации в PW после удаления сезонной компоненты по модели (3), описанной в следующем разделе, также характеризуются годичной сезонностью остаточных ошибок, размах которых возрастет до ± 10 мм в летний период и сходит почти до ± 1 мм в зимний, что характерно для всех станций. По данным работы Хуторова и др. (2018) основной вклад в эту дисперсию, по-видимому, вносят синоптические (от 3 до 45 суток) и мезомасштабные (от 10 мин до 10 ч) вариации PW .

Поскольку в этом исследовании главным образом анализируются долговременные вариации рядов, то для увеличения достоверности выводов из обеих баз были выбраны данные с продолжительностью наблюдений не менее 10 лет, каковых оказалось более 150. Помимо общих станций с такой продолжительностью наблюдений на территории ВЕП имеется ещё почти 80 станций в обеих базах.

3 Атмосферное влагосодержание на территории ВЕП

По данным 150 общих в NGL и VDB станций были получены средневзвешенные оценки разностей, приведенные в табл.1. В качестве весов использовалась продолжительность общей реализации PW на каждой станции.

Если иметь в виду, что ошибки точечных значений PW составляют, как правило, менее 0.5 мм, то следует признать хорошую сходимость результатов. Однако для PW разность результатов хоть и мала, но носит явно систематический характер. Поскольку нас интересуют долгопериодические и трендовые составляющие PW , то незначительный систематический сдвиг между данными в базах не скажется на этих оценках и, следовательно, можно использовать совокупность данных из обеих баз.

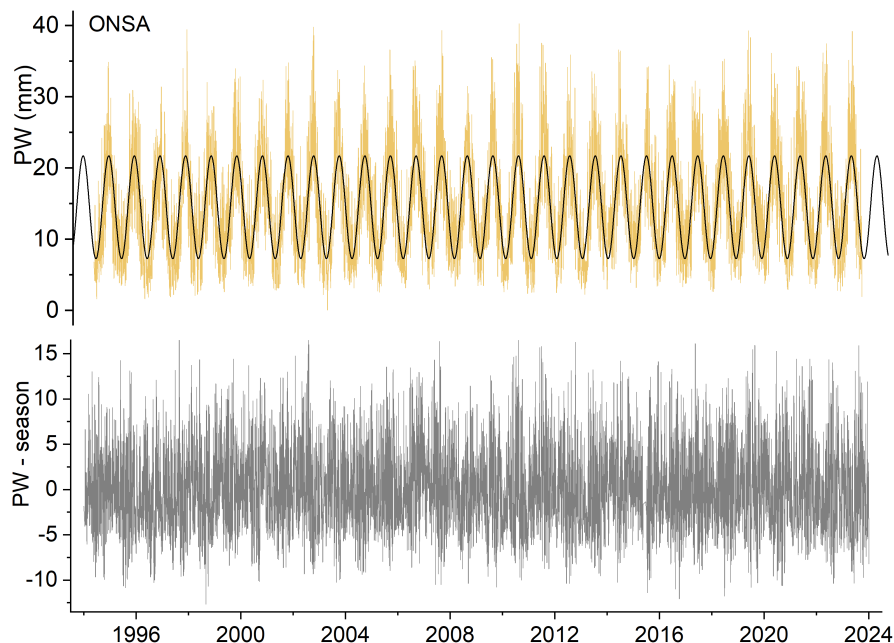


Рис. 1: Вверху – вариации PW для станции ONSA и их сезонная аппроксимация, внизу – остаточные вариации PW после снятия сезонной и трендовой МНК аппроксимации по формуле (3).

Табл. 1: Сравнение тропосферных параметров по базам (D=NGL-VDB)

	D (mm)
ZWD	$+0.14 \pm .06$
PW	$+0.43 \pm .01$

В свете сказанного во введении наибольший интерес в динамике атмосферного влагосодержания представляет его трендовая составляющая, несущая информацию о климатических изменениях в последние десятилетия. Тренд определялся из МНК модели:

$$X_i = X_0 + Vt_i + a_1 \sin(2\pi t_i) + a_2 \cos(2\pi t_i) + a_3 \sin(4\pi t_i) + a_4 \cos(4\pi t_i) + \nu_i \quad (3)$$

Здесь X_i – текущие значения ZWD, PW или поверхностной температуры T_s , поскольку температура используется из Reanalysis для оценки PW и присутствует в тропосферных данных. Размах значений PW составляет для отдельных станций от -0.036 до $+0.083$ мм/год при средней ошибке на станции ± 0.016 . В табл. 2 представлен средний ежегодный тренд вышеуказанных параметров для станций с разной продолжительностью наблюдений.

Табл. 2: Скорость изменения ZWD, PW и T_s

Dt / N	Vzwd (мм/год)	Vpw (мм/год)	VT (град/год)
Dt>10y / N=219	$+0.189 \pm .009$	$+0.030 \pm .002$	$+0.020 \pm .002$
Dt>15y / N=139	$+0.215 \pm .011$	$+0.034 \pm .002$	$+0.022 \pm .002$
Dt>20y / N=47	$+0.218 \pm .012$	$+0.035 \pm .002$	$+0.020 \pm .002$

По данным работы [Малинин и Гордеева \(2015\)](#) средний за последние десятилетия тренд влагосодержания над мировым океаном по данным метеорологических спутников (не ГНСС) со-

ставляет $+0.033$ мм/год, что блестяще совпадает с нашими оценками над ВЕП. В данных работы Хуторова и др. (2018) приведена на порядок превосходящая величина тренда PW для территории Татарстана, что, вероятно, является опечаткой или следствием недостаточной продолжительности использованных рядов (менее 7 лет). Исходя из этих оценок через 30–40 лет можно прогнозировать увеличение интегрального атмосферного влагосодержания над территорией ВЕП примерно на 1 мм. Относительно соответствующего роста температуры такого же вывода сделать нельзя, так как связь между ними нелинейна.

Заметной зависимости тренда атмосферного влагосодержания от положения станций не обнаруживается, как это видно из рис.2.

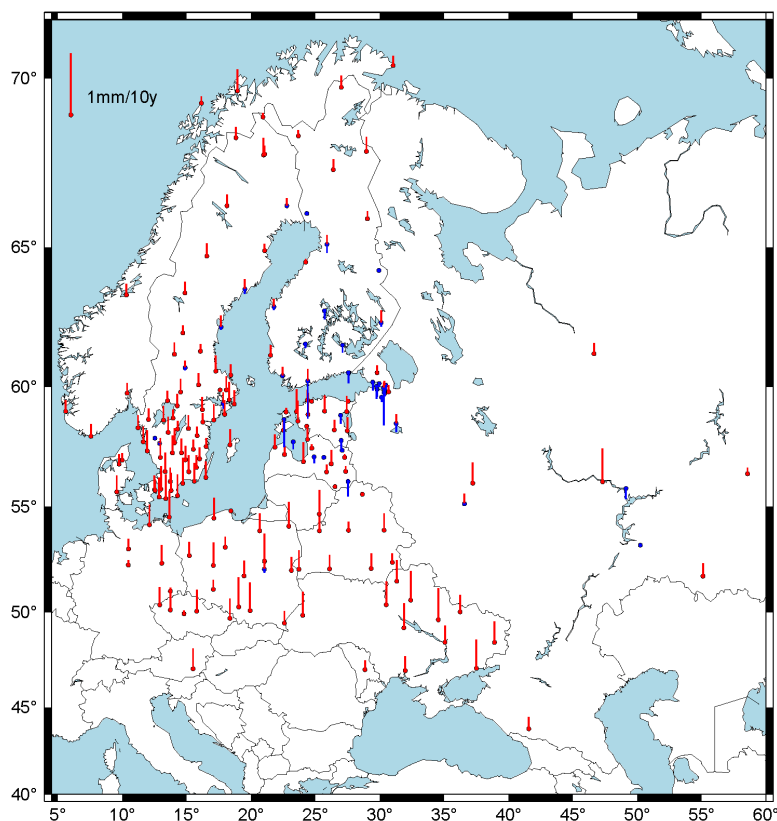


Рис. 2: Тренд атмосферного влагосодержания по данным 219 ГНСС станций (в мм за 10 лет)

По данным рядов с продолжительностью более 20 лет были вычислены спектры PW . Помимо мощной годовой и близкой к полугодовой (менее 10% от амплитуды годовой) гармоник, в некоторых наиболее продолжительных рядах обнаруживается слабая (1-2% от годовой амплитуды) составляющая в 1.5–2 года. К сожалению, недостаточная длительность рядов ГНСС-наблюдений пока не позволяет обнаружить в них возможный след солнечной активности в вариациях PW .

Список литературы

- Горшков В.Л., А.С. Гришина, Н.В. Щербакова, Мониторинг влагосодержания в атмосфере над территорией Ленинградской и смежных областей с помощью ГНСС. Труды ИПА РАН. 2019. 49, с.23-31. doi: 10.32876/ApplAstron.49.23-31.
- Горшков В.Л., Н.В. Щербакова, С.С. Смирнов, Пулковская база скоростей ГНСС-станций и её научный потенциал: геодинамика. Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове. 2024. 232, стр. 34-43. doi:10.31725/0367-7966-2024-232-34-43.
- Малинин В.Н., С.М.Гордеева. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным. Исследование земли из космоса. 2015. 1, с. 3–11.
- 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.
- Чукин В.В., Е.С. Алдошкина, А.В. Вахнин, А.Ю. Канухина, О.А. Мельникова. Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС-сигналами. Уч. Зап. РГГУ. 2010. 12, с. 50-59.
- Mendes V. B. Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. Brunswick: UNB. 1999. 353 p.

The dynamics of the atmospheric precipitable water vapor on GNSS observations over the territory of the East European craton

V.L. Gorshkov¹, N.V. Scherbakova¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 20 April 2024 / Accepted 3 May 2024

Abstract

GNSS data from the base maintained at the Pulkovo Observatory (VDB) and a similar base from the Nevada Geodetic Laboratory (NGL, USA) were used for research of the long-term dynamics of atmospheric precipitable water vapor over the territory of the East European Craton. The atmospheric precipitable water vapor is 0.03 mm/year.

key words: GNSS databases, tropospheric delay in GNSS observation, atmospheric precipitable water vapor