

Исследование изменения интегрального влагосодержания в тропосфере по данным ГНСС-наблюдений в зоне перехода «континент – океан» (Приморский край, Дальний Восток России)

Н. В. Шестаков^{2,3}, А. К. Кишкина^{1,2}, А. Н. Бугаец^{1,6}, Л. В. Гончуков^{1,4,5},
С. П. Королев⁷, Л. Н. Василевская², Е. А. Лялюшко²

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия
E-mail: kishkina.ako@dyfu.ru

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950, Россия
E-mail: lialiushko.ea@dyfu.ru

³ Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия
E-mail: shestakov.nv@dyfu.ru

⁴ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, 690091, Россия
E-mail: gonchukovlv@gmail.com

⁵ Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Владивосток, 690990, Россия
E-mail: gonchukovlv@gmail.com

⁶ Институт водных проблем РАН, Москва, 117971, Россия
E-mail: andrebugaets@yandex.ru

⁷ Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: serejk@gmail.com

В работе с использованием классической методики определения интегрального содержания водяного пара в тропосфере Земли (*англ.* integrated water vapor — IWV) по данным ГНСС-наблюдений на двух постоянно действующих пунктах, расположенных в континентальной и прибрежной частях Приморского края (Дальний Восток России), исследуется изменение IWV в зоне перехода «континент – океан». С использованием измерительной информации на ближайших станциях глобальной ГНСС-сети IGS и данных аэрологического зондирования подтверждена высокая точность и надёжность получаемых оценок атмосферного влагосодержания. На пунктах измерений изучено изменение IWV за период 2015–2019 гг., построены эмпирические аппроксимационные модели годовых вариаций IWV, полученные оценки сравнены с данными глобальных моделей GFS и Reanalysis ERA5. Изучены суточные изменения концентрации водяного пара в атмосфере, а также её изменение в период прохождения тайфунов, сопровождающихся выпадением массивных осадков. Установлено, что более 60 % массивных осадков (>20 мм) выпадают в течение 3–9 ч на спаде IWV после резкого возрастания регистрируемого ГНСС-методами интегрального влагосодержания. Высокая точность и частота определения IWV (до 1 Гц) в совокупности с высокой оперативностью получения информации об изменении IWV по данным ГНСС-наблюдений открывают широкие перспективы применения ГНСС-метеорологии в прогнозной практике гидрометслужб в Российской Федерации.

Ключевые слова: ГНСС-измерения, тропосфера, полная тропосферная задержка, интегральное влагосодержание атмосферы

Одобрена к печати: 13.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-266-276

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) широко используются для исследования состояния верхней (ионосфера) и нижней (тропосфера) атмосферы Земли. Данные о полной зенитной задержке ГНСС-сигналов (*англ.* zenith total delay — ZTD) позволяют получать информацию об интегральном содержании водяного пара в тропосфере (*англ.* integrated

water vapor — IWV). Сравнение полученных значений IWV с результатами зондирования другими методами показало высокую точность и эффективность данного подхода (Калинников, 2013; Bevis et al., 1992). Продолжающееся быстрое увеличение количества пунктов постояннодействующих ГНСС-сетей и совершенствование технологий оперативной обработки данных ГНСС-измерений привели к появлению международных и национальных баз данных ZTD и IWV, информация из которых «усваивается» различными моделями атмосферы (Cerlinia et al., 2014; Lee et al., 2010; Marín et al., 2015; Shi et al., 2015) и используется для прогнозирования погоды (Benevides et al., 2015; Bevis et al., 1992; Bosy et al., 2011; Yibin et al., 2017). В этой связи важное значение имеет повышение оперативности получения, уменьшение шага дискретизации и увеличение пространственной плотности данных о IWV.

Несмотря на большое количество зарубежных и отечественных работ, посвящённых методам и результатам определения IWV по данным ГНСС-измерений (Дембелов и др., 2015; Калинников, 2013; Чукин и др., 2010; Bevis et al., 1992; Bosy et al., 2011; Hong et al., 2015; Igondova, Cibulka, 2010; Lee et al., 2010), изменения интегрального влагосодержания в зоне перехода «континент—океан» все ещё недостаточно исследованы. Особенно это касается Дальневосточного региона и территории Приморского края в частности, в которых методы ГНСС-метеорологии до сих пор не использовались для получения и исследования изменения распределения водяного пара в тропосфере. В настоящей работе за период 2015–2019 гг. с интервалом 3 ч получены и анализируются ряды IWV на двух пунктах непрерывных ГНСС-наблюдений: VLAD (Владивосток) и IMAN (Дальнереченск), расположенных соответственно в прибрежной и континентальной частях края (рис. 1а). Результаты определения IWV сопоставлены с данными аэрологического зондирования, полученными на пунктах международной метеорологической сети № 31955 «Сад-Город» и № 31873 «Дальнереченск», расположенных в 12 и 8 км от ГНСС-станций, данными глобальной модели атмосферы GFS (англ. Global Forecast System; <https://www.ncdc.noaa.gov>) и глобальной климатической модели Reanalysis ERA 5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>). Также в работе анализируется изменение интегрального влагосодержания в период прохождения тайфунов Лайонрок (Lionrock) (2016) и Франциско (Francisco) (2019).

Методы исследования

Для моделирования и оценки задержки ГНСС-сигналов в тропосфере её условно подразделяют на два слоя: верхний (сухой, гидростатический) и нижний (влажный). Гидростатическая компонента тропосферной задержки составляет около 90 % от величины ZTD и легко поддаётся определению, поскольку сравнительно медленно изменяется с течением времени и в пространстве и зависит главным образом от приземного давления воздуха и высоты пункта над уровнем моря (Калинников, 2013; Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Igondova, Cibulka, 2010). Моделирование приземной (влажной) части тропосферы гораздо сложнее, поскольку задержка определяется распределением и концентрацией водяного пара в воздухе, которые подвержены значительным флуктуациям. В данном случае используется кусочно-непрерывный подход, когда влажная тропосферная задержка принимается равной константе и оценивается на некотором небольшом временном интервале (Bernese..., 2015), который практически может быть доведён до уровня дискретности ГНСС-измерений.

Если по результатам обработки ГНСС-наблюдений на станции определена величина полной тропосферной задержки ZTD (в метрах или миллиметрах), влажная составляющая ZWD (англ. zenith wet delay) может быть вычислена из выражения:

$$ZWD = ZTD - ZHD,$$

где ZHD (англ. zenith hydrostatic delay) — гидростатическая компонента задержки спутникового сигнала, для расчёта которой, как правило, используется модель (Saastamoinen, 1973):

$$ZHD = \frac{0,002277 P_0}{1 - 0,0026 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 H},$$

где P_0 — давление воздуха в миллибарах на пункте ГНСС-наблюдений; φ — его широта в радианах; H — высота пункта над уровнем моря в километрах.

Интегральное содержание водяного пара IWV (мм) может быть вычислено по следующей формуле (Калинников, 2013):

$$\text{IWV} = \frac{\text{ZWD}}{0,10631 + 1,73283/T_m},$$

где T_m — средневзвешенная температура атмосферы (К). Для её получения, как правило, используются зависимости вида:

$$T_m = a + bT_s,$$

где T_s — измеренная на пункте наблюдений или в его окрестностях приземная температура воздуха (К); a и b — постоянные коэффициенты, определённые эмпирически (Mendes, 1999; Zhangyu et al., 2019). В настоящей работе использовались значения $a = 50,4$ и $b = 0,789$, полученные для средних широт и приведённые в публикации (Bevis et al., 1992). Поскольку использованные в работе пункты ГНСС-наблюдений не оборудованы метеорологическими комплексами, значения приземной температуры T_s и давления P_0 на соответствующие эпохи ГНСС-наблюдений выбирались из архивных данных ближайших метеостанций, расположенных в указанных выше пунктах запуска радиозондов (<https://rp5.ru/>).

Необходимо отметить, что величины ZTD на выбранных пунктах спутниковых наблюдений получены в качестве побочного продукта в результате апостериорной обработки ГНСС-данных в программном комплексе Bernese Ver. 5.2 (Bernese..., 2015), выполняемой с целью мониторинга пространственных смещений станций. Однако эти же данные могут быть получены целенаправленно практически в режиме реального времени при помощи этого же или ряда других программных пакетов, предназначенных для программно-математической обработки ГНСС-измерений (Калинников, 2013; Хуторова и др., 2011).

Полученные результаты, их верификация и обсуждение

Описанная выше методика оценивания IWV предварительно тестировалась с использованием значений зенитной задержки и интегрального влагосодержания, полученных за январь–февраль и июль–август 2017 г. консорциумом UNAVCO (<https://www.unavco.org>) на ближайших к исследуемому региону пунктах BJFS и YSSK всемирной ГНСС-сети IGS (англ. International GNSS Service; <http://igs.org/network>). Медианное значение разности между вычисленными нами и приведёнными в базе данных UNAVCO величинами IWV составило 0,9 и 1,2 мм для первого и второго пунктов соответственно. Также вычисленные по результатам ГНСС-наблюдений величины IWV сопоставлены с аналогичными значениями, полученными с интервалом 12 ч за тот же временной период по данным аэрологического зондирования (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) и на основе глобальной климатической модели Reanalysis ERA 5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) (рис. 1б–д, см. с. 269). Из рисунка видно, что значения влагосодержания, определённые всеми тремя методами, близки, а полученные нами ГНСС-оценки IWV вполне могут использоваться для проведения самостоятельных исследований, а также «усваиваться» различными алгоритмами расчета цифровых моделей погоды и ее прогнозирования.

На станциях VLAD и IMAN вышеописанным методом с трёхчасовым интервалом были получены ряды изменений IWV за период 2014–2019 гг. (рис. 2а, б, см. с. 270). Аппроксимация рядов тригонометрическим рядом Фурье второго порядка $f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(wx) + b_1 \cdot \sin(wx) + a_2 \cdot \cos(2wx) + b_2 \cdot \sin(2wx)$, где $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, w$ — определяемые методом наименьших квадратов (МНК) коэффициенты, даёт среднеквадратическое отклонение 6,3 и 6,6 мм для пунктов VLAD и IMAN соответственно и достаточно хорошо описывает годовой ход IWV, что позволяет использовать аппроксимирующие кривые в качестве простых эмпирических моделей для прогноза концентрации интегрального влагосодержания для каждого пункта.

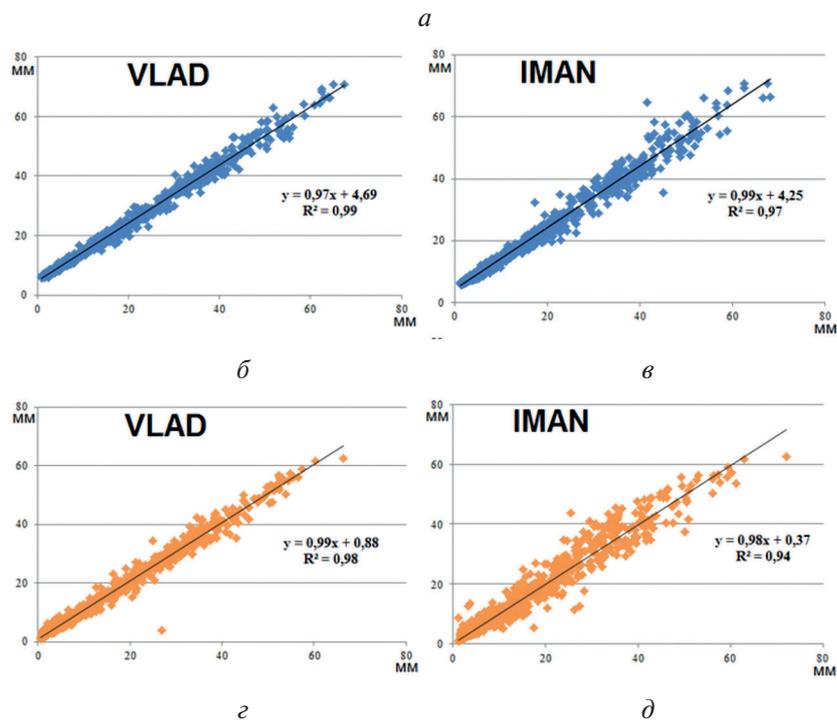


Рис. 1. Схема расположения района исследований (красный прямоугольник) относительно пунктов глобальной ГНСС-сети IGS (жёлтые ромбы на врезке), станций ГНСС-наблюдения (зелёные кружки) и пунктов радиозондирования (красные кружки). Картографическая подложка — Google Earth Pro (сервис Google Планета Земля) (а). Результаты сравнения оценок IWV, полученных по данным ГНСС-наблюдения (ось ординат), результатов радиозондирования (ось абсцисс, синяя заливка) и данных глобальной климатической модели Reanalysis ERA5 (ось абсцисс, оранжевая заливка) для пунктов VLAD и IMAN за период 2018–2019 гг. На каждом графике дано уравнение регрессии и коэффициент детерминированности (б–д)

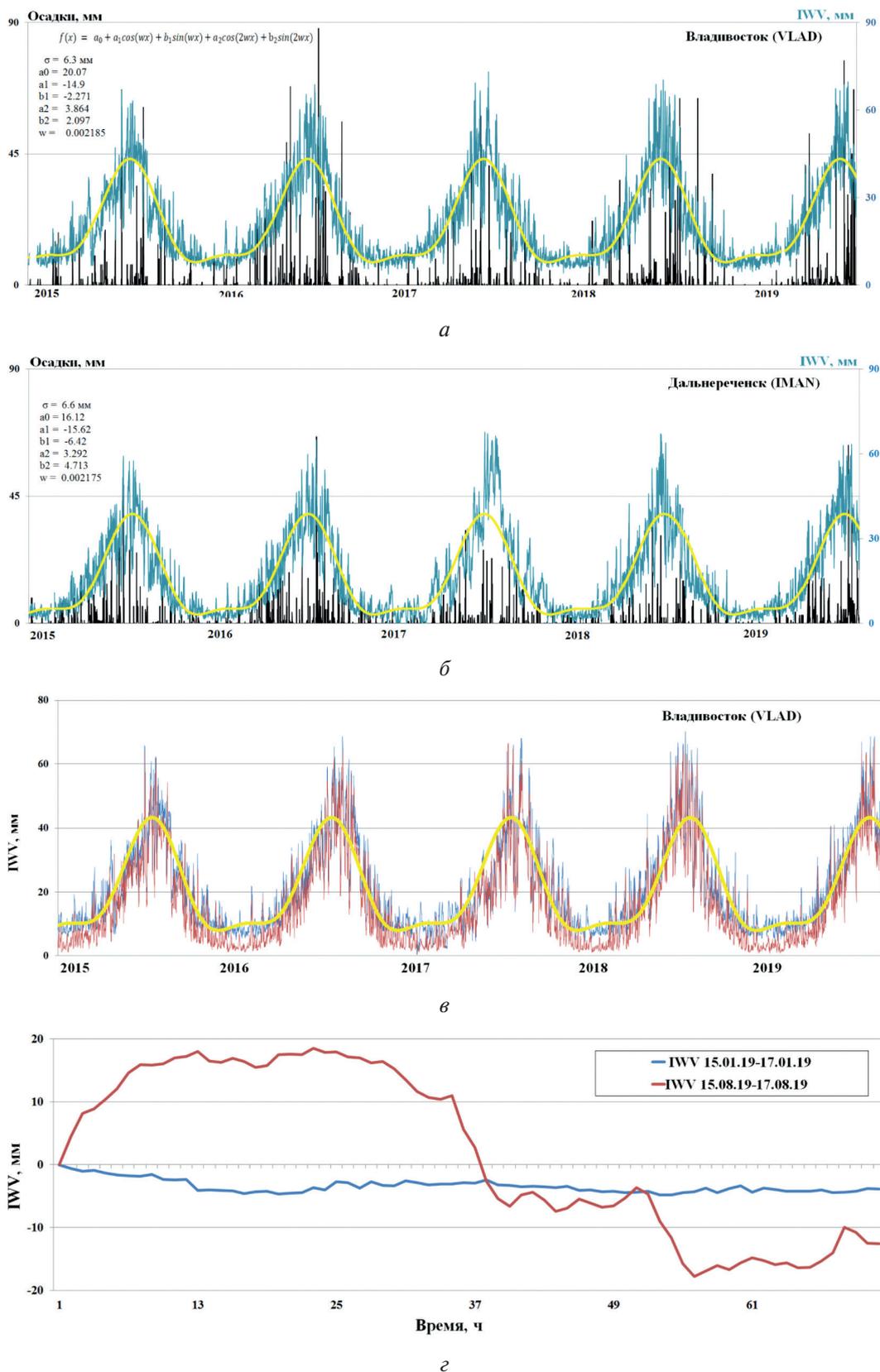


Рис. 2. Изменение интегрального влагосодержания на пунктах VLAD (а) и IMAN (б) за 2015–2019 гг. и количество выпавших осадков. Жёлтой линией показана аппроксимационная кривая. В левом верхнем углу даны МНК-оценки её коэффициентов и среднеквадратическое отклонение от данных наблюдений (σ). Сопоставление ГНСС- и GFS-оценок (даны синим и красным цветом соответственно) изменения IWV на станции VLAD (в). Относительное изменение IWV в течение 72 ч в периоды годового минимума и максимума влагосодержания (г)

Однако следует отметить, что данная модель систематически занижает значение IWV в среднем на 23–24 мм в периоды ежегодного кратковременного летнего «всплеска» концентрации водяного пара, что делает нецелесообразным её использование либо требует введения поправки к вычисленным значениям в этот временной промежуток. Из приведённых графиков видно, что годовое изменение количества водяного пара в нижней атмосфере Земли вблизи пунктов наблюдений носит весьма устойчивый характер без заметного векового тренда, но с выраженными годовой и полугодовой компонентами. Годовые колебания IWV слабо связаны с изменением количества выпавших осадков, что, вероятно, объясняется их формированием и переносом из отдалённых от исследуемого региона областей (Марченко и др., 2012). Амплитуда изменений IWV и его минимальные/максимальные абсолютные значения заметно различаются в пунктах ГНСС-зондирования: в районе станции IMAN, находящейся в континентальных районах Приморского края примерно в 250 км к западу от ближайшего морского побережья, значения интегрального влагосодержания изменяются от 1–6 до 55–65 мм, в то время как на пункте VLAD, расположенном на побережье Японского моря, средние значения IWV выше и колеблются в пределах от 6–11 до 65–70 мм. Минимумы и максимумы IWV на обеих станциях приходятся на январь и конец июля – начало августа соответственно. Наблюдаемое сезонное изменение концентрации водяного пара хорошо коррелирует с годовым изменением температуры воздуха, существенно влияющей на интенсивность процессов, происходящих в нижней атмосфере Земли. Однако соответствующие максимумы/минимумы ряда IWV запаздывают по отношению к аналогичным экстремумам графика изменений температуры. В целом наблюдаемый ход IWV типичен для умеренных широт (Калинников, 2013).

Измеренные и вычисленные с использованием эмпирических моделей значения IWV на обоих ГНСС-пунктах сравнены с оценками интегрального влагосодержания, извлечёнными на начало каждого суток по всемирному времени из глобальной модели атмосферы GFS (<https://www.ncdc.noaa.gov>), используемой в прогнозной практике Российской гидрометслужбы (рис. 2г). Для сравнения с нашими результатами использовались модельные значения IWV , извлечённые в ближайшем к ГНСС-станции узле сетки (шаг $0,25 \times 0,25^\circ$), расположенном на расстоянии 10,4 и 9,8 км от пунктов VLAD и IMAN соответственно. Из рисунка видно, что данные GFS в целом хорошо соответствуют измеренным значениям IWV , но систематически недооценены примерно на 5 мм, что особенно заметно в зимние месяцы. Среднеквадратическое отклонение нашей аппроксимационной модели от результатов ГНСС-измерений практически совпадает с аналогичным показателем для GFS (около 6–7 мм).

Более высокая по сравнению с методом аэрологического зондирования частота дискретизации ГНСС-измерений позволяет изучить особенности суточного хода интегрального влагосодержания в пунктах ГНСС-наблюдений. В отличие от годового хода суточные изменения концентрации водяного пара не демонстрируют выраженных закономерностей и подвержены резким перепадам. Амплитуды таких колебаний, как правило, находятся в пределах от 2–3 до 4–6 мм в периоды минимальной концентрации водяного пара в атмосфере (январь – февраль) и изменяются от 7–10 до 20 мм и более в июле – августе. На рис. 2в показаны примеры изменения IWV в период сезонного максимума и минимума. Резкие колебания IWV могут происходить на фоне выпадения осадков, хотя достаточно часто регистрируются и без них.

В этой связи особый интерес представляет изменение интегрального содержания водяного пара непосредственно до и после, а также во время прохождения тайфунов – разновидностей тропических циклонов, ежегодно проходящих через территорию Приморского края и приносящих обильные осадки. На рис. 3 представлены графики изменения четырёх параметров: приземной температуры T_s (К), давления P_0 (мбар), IWV (мм), выпавших осадков (мм) – в период прохождения через пункты ГНСС-наблюдений разрушительных тайфунов Лайонрок (31 августа – 1 сентября 2016 г.) и Франциско (8 августа 2019 г.). Анализ данных показывает, что за несколько дней до подхода тайфуна наблюдается снижение атмосферного давления, резкие колебания температуры воздуха и возрастание концентрации водяного пара в атмосфере в районе пункта ГНСС-наблюдений, причём максимум IWV не всегда совпадает

с пиком выпадения осадков, а нередко предваряет его на 3–9 ч, т.е. массивные осадки, как правило, происходят на спаде IWV. Также необходимо отметить, что одним из признаков сильных осадков является увеличение скорости изменения IWV во времени, что в совокупности с первым признаком может быть использовано в прогностических целях (Marín et al., 2015; Yibin et al., 2017). В ряде случаев интегральное влагосодержание атмосферы испытывает резкие колебания с амплитудами до 10–20 мм за 2–5 дней до активного воздействия тайфуна на зондируемую область. Когда тайфун покидает её, IWV начинает быстро понижаться и восстанавливается до средних значений, характерных для данного сезона, за время от нескольких часов до нескольких дней (Liou, Huang, 2000).

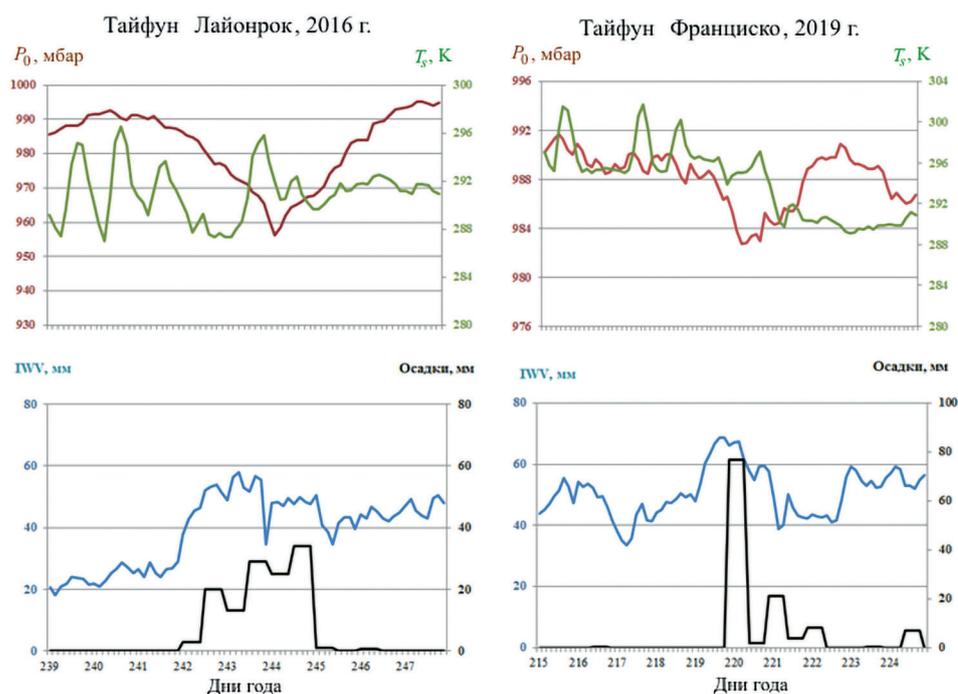


Рис. 3. Изменение приземной температуры воздуха T_s , давления P_0 , интегрального влагосодержания (IWV) и количества выпавших осадков в период прохождения тайфунов Лайонрок (2016) и Франциско (2019) на ГНСС-станции VLAD

Заключение

В настоящем исследовании реализована методика определения интегрального влагосодержания в нижней тропосфере Земли по данным пунктов ГНСС-наблюдений VLAD (Владивосток) и IMAN (Дальнереченск), расположенных соответственно в прибрежной и континентальной частях Приморского края. Результаты сравнения ГНСС-оценок IWV с аналогичными величинами, полученными по данным ближайших пунктов сети аэрологического зондирования и глобальной модели Reanalysis ERA 5, подтверждают их высокую точность и надёжность. Выгодным отличием метода ГНСС-зондирования является его высокое временное разрешение и возможность оперативного получения значений концентрации водяного пара вблизи пункта наблюдений. В результате анализа информации об изменении IWV по данным ГНСС-измерений за пятилетний период на обоих пунктах наблюдений выяснено, что годовой ход содержания водяного пара имеет стабильный характер с выраженными годовой и полугодовой компонентами. Амплитуды колебаний IWV в континентальных и прибрежных районах заметно различаются и изменяются от 1 до 70 мм, что объясняется различием климатических условий этих пунктов. Суточные вариации IWV подвержены резким колебаниям, особенно в летний период, что не в последнюю очередь связано с прохождением через территорию края тайфунов, сопровождающихся выпадением обильных осадков. Анализ

изменения содержания водяного пара во время движения тайфунов через пункты наблюдения показал, что более 60 % массивных осадков (>20 мм) выпадают в течение 3–9 ч на спаде IWV после резкого возрастания регистрируемого ГНСС-методами интегрального влагосодержания, что в совокупности с высокой точностью (до нескольких миллиметров) и частотой дискретизации ГНСС-определений IWV (до 1 Гц), а также возможностью оперативного получения результатов зондирования (при необходимости — практически в режиме реального времени) открывает большие перспективы улучшения методов оперативного прогнозирования сильных осадков.

Представляется перспективным оперативное получение оценок IWV на большом количестве постоянно действующих ГНСС-станций, расположенных на зондируемой и сопредельных территориях, и использование их при расчёте региональных цифровых моделей погоды с целью их уточнения и повышения надёжности последних.

В работе использованы данные геодинимической ГНСС-сети ДВО РАН-ДВФУ (Sorokin et al., 2017) и данные Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. При обработке данных были использованы компьютерные алгоритмы и системы, разработанные при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-29-03196. Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН» (Sorokin et al., 2017), финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2021-663. Отдельная благодарность В. В. Калининскому за ценные рекомендации и помощь при отладке и тестировании методики расчёта IWV по данным ГНСС-измерений.

Литература

1. Дембелов М. Г., Башкуев Ю. Б., Лухнев А. В., Лухнева О. Ф., Саньков В. А. Диагностика содержания атмосферного водяного пара по данным GPS-измерений // Оптика атмосферы и океана. Дистанционное зондирование атмосферы, гидросферы и подстилающей поверхности. 2015. № 2. С. 172–177.
2. Калинин В. В. Восстановление интегрального влагосодержания атмосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань, 2013. 18 с.
3. Марченко О. Ю., Мордвинов В. И., Антохин П. Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенга // Оптика атмосферы и океана. 2012. № 12. С. 1084–1090.
4. Сорокин А. А., Королев С. П., Шестаков Н. В., Мальковский С. И., Цой Г. И., Пупатенко В. В. Организация работы с данными глобальных навигационных спутниковых систем для комплексного исследования современных геодинимических процессов на юге Дальнего Востока России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 158–172. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172.
5. Хуторова О. Г., Тептин Г. М., Васильев А. А., Калинин В. В., Хуторов В. Е., Курбангалиев Т. Р. Мониторинг тропосферы аппаратно-программным комплексом сети станций приемников спутниковых навигационных систем и численной мезомасштабной модели. // Международный симп. «Атмосферная радиация и динамика»: сб. тез. СПб., 2011. С. 60–61.
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 // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. Метеорология. 2010. № 12. С. 50–59.
7. Benevides P., Catalo J., Miranda P. M. A. On the inclusion of GPS perceptible water vapor in the nowcasting of rainfall // Natural Hazards Earth System Sciences. 2015. V. 15. P. 2605–2616.
8. Bernese GPS Software Version 5.2 / eds. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. Bern: AIUB, 2015. 612 p.
9. Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R., Ware R. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. P. 787–801.
10. Bosty J., Rohm W., Sierny J., Kaplon J. GNSS Meteorology // TransNav, Intern. J. Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2011. V. 5. No. 1. P. 79–83.
11. Cerlinia P. B., Cotanaa F., Rossia F., Asdrubalia F. Numerical modeling of atmospheric water content and probability evaluation. Part I // Procedia Engineering. 2014. V. 70. P. 321–329.

12. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wastle E.* GNSS — Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, GALILEO, and more. Wein: Springer Science and Business Media, 2008. 518 p.
13. *Hong L., Yunchang C., Xiaomin W., Zhifang X., Haishen W., Heng H.* Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China // *Geodesy and Geodynamics*. 2015. V. 6. P. 135–142.
14. *Igondova M., Cibulka D.* Precipitable Water Vapour and Zenith Total Delay time series and models over Slovakia and vicinity // *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 2010. V. 40. No. 4. P. 299–312.
15. *Lee J., Park J., Cho J., Baek J., Kim H.* A characteristic analysis of fog using GPS-derived integrated water vapour // *Meteorological Application*. 2010. V. 17. P. 463–473.
16. *Liou Y., Huang C.* GPS observations of PW during the passage of a typhoon // *Earth Planets Space*. 2000. V. 52. No. 10. P. 709–712.
17. *Marin J. C., Pozo D., Curé M.* Estimating and forecasting the precipitable water vapor from GOES satellite data at high altitude sites // *Astronomy and Astrophysics*. 2015. V. 573. Art. No. A41. 10 p.
18. *Mendes V.B.* Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. Technical report No. 199. Brunswick: UNB, 1999. 353 p.
19. *Saastamoinen J.* Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction // *Bull. Géodésique*. 1973. V. 107. P. 13–34.
20. *Shi J., Xu C., Guo J., Gao Y.* Real-Time GPS Precise Point Positioning-Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. Iss. 6. P. 3452–3459.
21. *Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // *Scientific and Technical Information Processing*. 2017. V. 4. P. 302–304.
22. *Yibin Y., Lulu S., Qingzhi Z.* Establishing a method of shortterm rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. Art. No. 12465. 11 p.
23. *Zhangyu S., Bao Z., Yibin Y.* A Global Model for Estimating Tropospheric Delay and Weighted Mean Temperature Developed with Atmospheric Reanalysis Data from 1979 to 2017 // *Remote Sensing*. 2019. V. 11(16). Art. No. 1893. 21 p.

Investigation of integrated water vapor content variations in troposphere in the continent-ocean transition zone (Primorsky Krai, Far East of Russia) from GNSS observations

N. V. Shestakov^{2,3}, A. K. Kishkina^{1,2}, A. N. Bugaets^{1,6}, L. V. Gonchukov^{1,4,5},
S. P. Korolyov⁷, L. N. Vasilevskaya², E. A. Lialiushko²

¹ Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: kishkina.ako@dyfu.ru

² Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia
E-mail: lialiushko.ea@dyfu.ru

³ Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: shestakov.nv@dyfu.ru

⁴ Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute
Vladivostok 690091, Russia
E-mail: gonchukovlv@gmail.com

⁵ Primorye Administration for Hydrometeorology
and Environmental Monitoring, Vladivostok 690990, Russia
E-mail: gonchukovlv@gmail.com

⁶ Water Problems Institute, Moscow 117971, Russia
E-mail: andreymbugaets@yandex.ru

⁷ Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: serejk@gmail.com

In this work, using the classical technique for determining of the integral water vapor content in the Earth's troposphere (Integrated Water Vapor — IWV) we studied the IWV variations in the continent-ocean transition zone from GNSS observations at two points located in the continental and coastal parts of Primorsky Krai (Far East of Russia). Using the measurements at the nearest stations of the global GNSS-network IGS and radiosonde data the high accuracy and reliability of the estimates of atmospheric moisture content have been confirmed. At the measurement points, IWV variations for the period from 2015 to 2019 were studied, empirical approximation models of annual variations in IWV were constructed, the obtained estimates were compared with the data of the global model GFS and Reanalysis ERA5. The diurnal changes in the concentration of water vapor in the atmosphere, as well as its change during the passage of typhoons, accompanied by massive precipitation, were studied. It was found that more than 60 % of massive precipitation (>20 mm) falls within 3–9 hours at the IWV decline after a sharp increase in the integral moisture content recorded by GNSS methods. The high accuracy and frequency of IWV determination (up to 1 Hz), together with the high efficiency of obtaining information about the IWV change from GNSS observations, open up broad prospects for the application of GNSS meteorology in the forecasting practice of hydrometeorological services in the Russian Federation.

Keywords: GNSS-measurements, troposphere, Zenith Total Delay, integrated water vapor content

Accepted: 13.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-266-276

References

1. Dembelov M. G., Bashkuev Yu. B., Likhnev A. V., Likhneva O. F., San'kov V. A., Diagnostics of the content of atmospheric water vapor according to data of GPS measurements, *Optika atmosfery i okeana. Distantionnoe zondirovanie atmosfery, gidrosfery i podstilayushchei poverkhnosti*, 2015, No. 2, pp. 172–177 (in Russian).
2. Kalinnikov V. V., *Vosstanovlenie integral'nogo vlagosoderzhaniya atmosfery s pomoshch'yu global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh system: Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk* (Reconstruction of the integral moisture content of the atmosphere using global navigation satellite systems, Ext. abstract Cand. phys. mat. sci. thesis), Kazan, 2013, 18 p. (in Russian).

3. Marchenko O. Yu., Mordvinov V. I., Antochin P. N., Investigation of long-term variability and conditions for formation of precipitation in the Selenge river basin, *Optika atmosfery i okeana*, 2012, No. 12, pp. 1084–1090 (in Russian).
4. Sorokin A. A., Korolev S. P., Shestakov N. V., Malkovsky S. I., Tsoy G. I., Pupatenko V. V., Data management of global navigation satellite system for complex study of modern geodynamic processes in Far East of Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 158–172, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172.
5. Khutorova O. G., Teptin G. M., Vasil'ev A. A., Kalinnikov V. V., Khutorov V. E., Monitoring of the troposphere by the hardware and software complex of a network of receiver stations of satellite navigation systems and a numerical mesoscale model, *Mezhdunarodnyi simpozium "Atmosfernaya radiatsiya i dinamika"* (Intern. Symp. "Atmospheric Radiation and Dynamics"), Book of abstr., Saint Petersburg, 2011, pp. 60–61 (in Russian).
6. Chukin V. V., Aldoshkina E. S., Vakhnin A. V., Kanukhina A. Yu., Melnikova O. A., Monitoring integral'nogo sodержaniya vodyanogo para v atmosfere GNSS-signalami, *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. Meteorologiya*, 2010, No. 12, pp. 50–59 (in Russian).
7. Benevides P., Catalo J., Miranda P. M. A., On the inclusion of GPS perceptible water vapor in the nowcasting of rainfall, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 2015, Vol. 15, pp. 2605–2616.
8. *Bernese GPS Software Version 5.2*, Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (eds.), Bern: AIUB, 2015, 612 p.
9. Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R., Ware R., GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, pp. 787–801.
10. Bosy J., Rohm W., Sierny J., Kapłon J., GNSS Meteorology, *TransNav, Intern. J. Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2011, Vol. 5, No. 1, pp. 79–83.
11. Cerlinia P. B., Cotanaa F., Rossia F., Asdrubalia F., Numerical modeling of atmospheric water content and probability evaluation, Part I, *Procedia Engineering*, 2014, Vol. 70, pp. 321–329.
12. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E., *GNSS — Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, GALILEO and more*, Wien: Springer Science and Business Media, 2008, 518 p.
13. Hong L., Yunchang C., Xiaomin W., Zhifang X., Haishen W., Heng H., Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China, *Geodesy and Geodynamics*, 2015, Vol. 6, pp. 135–142.
14. Igondova M., Cibulka D., Precipitable Water Vapour and Zenith Total Delay time series and models over Slovakia and vicinity, *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 2010, Vol. 40, No. 4, pp. 299–312.
15. Lee J., Park J., Cho J., Baek J., Kim H., A characteristic analysis of fog using GPS-derived integrated water vapour, *Meteorological Application*, 2010, Vol. 17, pp. 463–473.
16. Liou Y., Huang C., GPS observations of PW during the passage of a typhoon, *Earth Planets Space*, 2000, Vol. 52, No. 10, pp. 709–712.
17. Marín J. C., Pozo D., Curé M., Estimating and forecasting the precipitable water vapor from GOES satellite data at high altitude sites, *Astronomy and Astrophysics*, 2015, Vol. 573, Art. No. A41, 10 p.
18. Mendes V. B., *Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques*, Technical report No. 199, Brunswick: UNB, 1999, 353 p.
19. Saastamoinen J., Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction, *Bull. Géodésique*, 1973, Vol. 107, pp. 13–34.
20. Shi J., Xu C., Guo J., Gao Y., Real-Time GPS Precise Point Positioning-Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, Issue 6, pp. 3452–3459.
21. Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P., The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia, *Scientific and Technical Information Processing*, 2017, Vol. 4, pp. 302–304.
22. Yibin Y., Lulu S., Qingzhi Z., Establishing a method of shortterm rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application, *Scientific Reports*, 2017, Vol. 7, Art. No. 12465, 11 p.
23. Zhangyu S., Bao Z., Yibin Y., A Global Model for Estimating Tropospheric Delay and Weighted Mean Temperature Developed with Atmospheric Reanalysis Data from 1979 to 2017, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(16), Art. No. 1893, 21 p.