

ВАЛИДАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛОВ ГНСС

© 2019 г. В. В. Калинин*, О. Г. Хуторова

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18*

**E-mail: Vlad-kalinnikov@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

Принята к печати 03.04.2019 г.

В статье проведено сравнение рядов интегрального содержания водяного пара (ИСВП) за 2015–2017 гг. на 8 парных станциях ГНСС и солнечных фотометров сети AERONET в Европе. Расстояние между парами станций не превышало 20 км. Показано, что среднее и стандартное отклонения расхождений имеют сезонный ход. Зимой среднее отклонение ГНСС-фотометр составило от -0.61 до 0.34 мм. Летом ГНСС завывает ИСВП относительно фотометров на величины от 0.52 до 2.26 мм. Стандартное отклонение максимально летом и составляет от 1.31 до 1.64 мм, зимой снижается до 0.49 – 0.86 мм, что составляет 5–6% от величины ИСВП.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, солнечный фотометр, интегральное содержание водяного пара.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555458-63>

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения радиосигналов Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) сейчас широко используются для восстановления значений интегрального содержания водяного пара в атмосферном столбе (ИСВП), градиентных параметров тропосферных задержек, а также наклонных тропосферных задержек по отдельным направлениям [1]. Эти последние, измеренные в сети станций, позволяют строить трехмерные поля абсолютной влажности, что дает возможность определять ИСВП с пространственным разрешением, соответствующим плотности сети [2]. В случае определения ИСВП по одиночным станциям, эффективные размеры области по которой усредняются значения ИСВП, зависят от наличия в обработке северного и восточного градиентных параметров тропосферной задержки, которые учитывают горизонтальную анизотропию распределения влажности вокруг станции и позволяют существенно повышать пространственное разрешение метода.

К примеру, в работе [3] рассматривались особенности поля ИСВП вокруг Парижа, полученное по сети с плотностью станций около 15 км. В свою очередь, в [2] по сети станций ГНСС, плотность которой составляла около 5 км, исследован суточный цикл ИСВП в Марселе как результат взаимодействия Мистралья и бризовой активности. Было показано, что полученные оценки ИСВП позволяют хорошо разрешать локальные потоки переноса влажности. Отметим также, что в новейших работах для увеличения пространственного разрешения оценок ИСВП и лучшего учета локальных неоднородностей тропосферы были предложены модели, позволяющие оценивать большее число градиентных параметров [4, 5]. Применение ГНСС для зондирования водяного пара объясняется способностью выдавать результаты с высоким пространственным и временным разрешением при любых погодных условиях. В Казанском федеральном университете проводятся такого рода исследования [6, 7] с использованием собственного приложения TgropoGNSS (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2014614454).

Таблица 1. Сведения о местоположении станций ГНСС

ID ГНСС станции	Город	B (°)	L (°)	H (м)	ΔH (м)	ΔS (км)	ID метеостанции
POTS	Потсдам	52.4	13.1	104	24	18.9	10382
LEIJ	Лейпциг	51.4	12.4	134	9	4.2	10471
BRUX	Брюссель	50.8	4.4	113	-7	0	6447
GLSV	Киев	50.4	30.5	201	0	0	33345
GANP	Попрад	49.0	20.3	704	-2	0	11952
BUCU	Бухарест	44.5	26.1	109	19	14.9	15422
TLSE	Тулуза	43.6	1.5	158	-2	8.7	7630
MOSE	Рим	41.9	12.5	72	-58	14.2	16242

Целью настоящего исследования является сравнение оценок ИСВП, полученных с помощью указанного приложения, с данными альтернативной технологии. Ранее неоднократно проводились такого рода сравнения между данными ГНСС, РСДБ, радиозондов, радиометров, солнечных фотометров и реанализов [8–13]. При выборе альтернативной технологии крайне важно, чтобы она обеспечивала широкий географический охват, высокое временное разрешение и обладала открытыми данными. В этой связи представляет особый интерес провести сравнения ГНСС ИСВП с рядами той же величины, полученными из сети солнечных фотометров AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), тем более что ранее проводившееся нами исследование показывает лучшее согласие данных ГНСС с фотометрами, чем с радиозондами [14].

Кратко отметим, что TropoGNSS реализует абсолютный алгоритм обработки измерений систем GPS и ГЛОНАСС, называемый в англоязычной литературе Precise Point Positioning (PPP) [15, 16]. Двухчастотные измерения позволяют почти исключать ионосферное влияние на обработку [17]. Оцениваемые с шагом 30 с зенитная тропосферная задержка ZTD и два градиентных параметра связывались с наклонными задержками картирующими функциями [18, 19]. Угол отсечки по зенитному углу составлял 83°. Пересчет ZTD в ИСВП осуществлялся согласно общепринятым моделям [20–22]. Оценка точности ZTD, основанная на стандартном отклонении остаточных разностей измерений, составляла около 1.5 мм. С учетом ошибок моделей пересчета точность ИСВП оценивается приблизительно в 0.55 мм [23]. Заметим, что вклад негетических составляющих в ZTD (таких как гидро-

метеоры и аэрозоли) обычно меньше 1 мм [24]. В свою очередь подробности фотометрического метода изложены в работах [25, 26].

2. ДАННЫЕ

Нами было отобрано 8 станций Международной службы ГНСС (IGS, <http://www.igs.org/>) в Европе, удаленных не более чем на 20 км от станций сети AERONET. Помимо этого в качестве критерия отбора учитывалась доступность данных за период 2015–2017 гг. В табл. 1 приведен список отобранных ГНСС станций, их широта (B), долгота (L) и абсолютная высота (H), а также превышение над смежной станцией AERONET (ΔH) и взаимное разнесение этих станций (ΔS). Заметим, что мы не применяли никаких алгоритмов высотной редукции ИСВП, поскольку ΔH не превышает 72 м и, согласно работе [11], поправки за такое небольшое превышение никак не улучшают результаты сравнения. Необходимые для пересчета ZTD в ИСВП приземные измерения температуры и давления были получены с ближайших официальных метеорологических станций, синоптические индексы которых также приведены в табл. 1

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 2 приведены средние и стандартные отклонения значений ИСВП между ГНСС и фотометрами для каждого из сезонов, а также соответствующие объемы выборки (число пар в сравнении). При этом сравнивались те значения ИСВП, которые по времени отстояли

Таблица 2. Результаты сравнения ИСВП между ГНСС и фотометрами

ID ГНСС станции	Среднее отклонение (мм)				Стандартное отклонение (мм)				Объем выборки			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
POTS	0.34	0.90	2.26	0.95	0.65	1.00	1.55	1.27	99	1319	2322	1552
LEIJ	-0.61	0.05	1.05	0.30	0.60	1.15	1.38	1.06	1076	2969	4873	2533
BRUX	-0.53	-0.56	0.52	-0.02	0.52	0.91	1.31	1.32	545	2671	3154	1855
GLSV	-0.28	0.34	1.37	0.62	0.49	0.84	1.40	1.21	1209	5018	8043	3174
GANP	-0.10	1.07	2.10	0.70	0.52	1.05	1.34	1.20	887	2418	5426	3096
BUCU	0.08	0.59	1.86	1.24	0.65	0.90	1.52	1.24	2057	4028	9476	4168
TLSE	-0.18	0.23	1.50	0.45	0.86	1.04	1.54	1.29	1965	3693	4690	3272
MOSE	0.15	0.54	1.80	1.39	0.86	1.05	1.64	1.65	3856	5329	4398	2781

Таблица 3. Средние сезонные значения ИСВП и относительного стандартного отклонения

ID ГНСС станции	ИСВП (мм)				Стандартное отклонение, %			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
POTS	10.08	13.03	24.86	16.92	6.4	7.7	6.2	7.5
LEIJ	9.63	13.02	25.33	17.03	6.2	8.8	5.4	6.2
BRUX	11.30	13.36	24.81	17.64	4.6	6.8	5.3	7.5
GLSV	8.57	13.32	24.33	14.77	5.7	6.3	5.8	8.2
GANP	7.14	11.45	21.87	13.86	7.3	9.2	6.1	8.7
BUCU	9.99	16.07	28.21	19.08	6.5	5.6	5.4	6.5
TLSE	12.11	16.02	27.80	18.83	7.1	6.5	5.5	6.9
MOSE	12.83	16.50	27.51	21.81	6.7	6.4	6.0	7.6

друг от друга не более чем на 5 мин. Из табл. 2 можно хорошо видеть, что среднее отклонение минимально зимой (от -0.61 до 0.34 мм) и максимально летом (от 0.52 до 2.26 мм). В свою очередь, стандартное отклонение также показывает сезонный ход. Зимой оно составило от 0.49 до 0.86 мм, а летом достигает, в зависимости от станции, от 1.31 до 1.64 мм. Станции указаны в порядке убывания широты и поэтому можно также отметить, что стандартное отклонение расхождений растет в южном направлении. В свою очередь, как показано в табл. 3 относительное стандартное отклонение не имеет явной широтной зависимости и в большинстве случаев составило 5–6%.

Среднеквадратическое отклонение варьируется в зависимости от станции от 0.53 до 0.88 мм зимой и от 1.41 до 2.74 мм летом.

Стоит также обратить внимание на объемы выборки, которые показывают, что выбранный нами трехлетний интервал является минималь-

но возможным для проведения сравнения в зимний период. Рассмотрение диаграмм рассеяния показало, что ряды ИСВП от обеих технологий сильно коррелированы друг с другом, однако линия тренда всегда имеет угловой коэффициент меньше единицы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Заявленная выше оценка точности ZTD в 1.5 мм получена на основании стандартного отклонения остаточных разностей и потому является мерой внутренней сходимости решения. Обзор ошибок подробно представлен в работе [16]. Здесь отметим только проблему, находящуюся за пределами собственно алгоритма обработки данных ГНСС. В настоящее время для пересчета ZTD в ИСВП как стандарт используются коэффициенты Бэвиса [20]. Однако, Рюгер в своей работе подверг критике методику Бэвиса и опубликовал свой набор коэффициентов [27].

Замена коэффициентов Бэвиса на коэффициенты Рюгера приводит к уменьшению оценки ИСВП на величину $0.4 \text{ мм} + 0.005 \cdot \text{ИСВП}$ [14]. Если предположить, что используемые нами коэффициенты Бэвиса действительно завышают оценки ИСВП, то этим можно отчасти объяснить наблюдаемый сезонный ход средних отклонений между ГНСС и фотометрами.

В работе [11] с помощью другого алгоритма обработки данных ГНСС для Брюсселя установлено схожее с тем, что мы получили в настоящем исследовании, отрицательное среднее отклонение ГНСС–фотометр при низких ИСВП и положительное при высоких. Последнее объяснялось тем фактом, что данные солнечного фотометра даются только при условии ясного неба в направлении Солнца. В свою очередь ГНСС измеряет интегральное содержание водяного пара в разных наклонных направлениях на спутники (как занятым облаками, так и нет), что способствует увеличению общей оценки ИСВП по всем спутникам.

В других работах получены разные значения средних отклонений. Так для одного из влажных регионов Бразилии за полтора месяца сравнения среднее отклонение ГНСС–фотометр составило 5.9 мм [28]. В работе [13] за два месяца сравнения в Германии среднее отклонение между ГНСС и фотометром было практически нулевым. Примечательно, что в той же работе для пары солнечный фотометр–МКВ-радиометр получено среднее отклонение -0.3 мм , а для пары солнечный фотометр–радиозонд оно составило 0.4 мм . В работе [29] для пригорода Санкт-Петербурга также отмечено занижение ИСВП по данным фотометра относительно МКВ-радиометра на 1.56 мм . В работе [14] для пары ГНСС–фотометр получены годовые средние отклонения -0.1 мм и 0.3 мм соответственно для Якутска и Тикси. В работе [30] для Онсалы, Швеция для месячного сравнения ГНСС–МКВ-радиометр отклонение составило около 1.4 мм . В отношении среднеквадратических отклонений между данными ГНСС и фотометров имеются сведения из работы [13], где оно получено для весеннего сезона равным 0.91 мм , что близко к нашим результатам.

Полученные в этих работах результаты, скорее всего, могут быть связаны с пространственными неоднородностями поля водяного пара, поскольку все датчики либо выполняют измерения в разных направлениях, либо разнесены в пространстве. В работе [13] показано, что мезомасштабные неоднородности поля водяно-

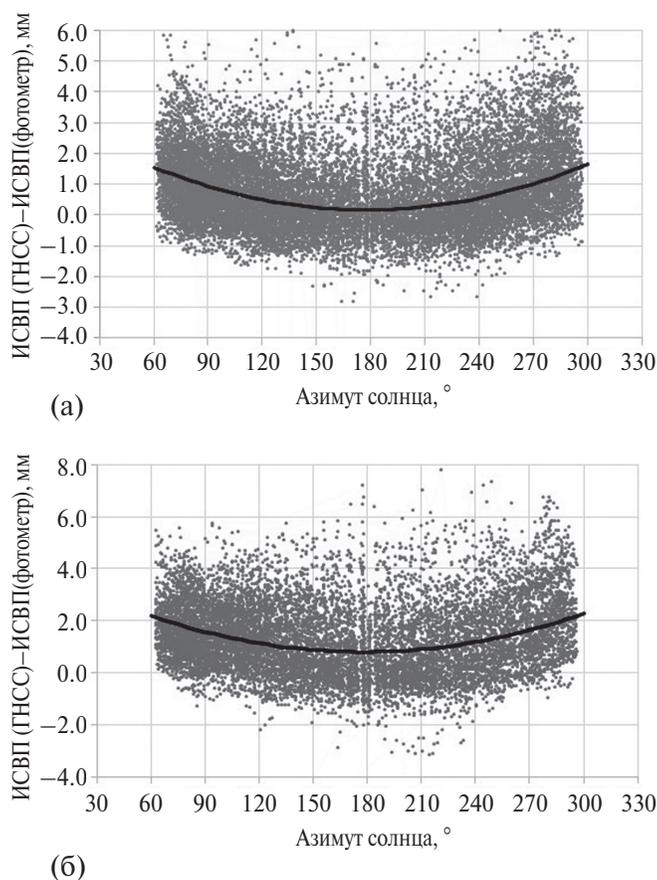


Рис. 1. Распределение расхождений значений ИСВП по данным ГНСС и фотометра в зависимости от азимута Солнца для Киева (а), и Попрада (б). Черная кривая показывает параболическую аппроксимацию.

го пара на расстоянии 10 км вызывают увеличение стандартного отклонения сравниваемых значений ИСВП на 0.5 мм . В этом контексте стоит рассмотреть примеры распределения расхождений ГНСС–фотометр в зависимости от азимута Солнца, показанные на рис. 1. Хорошо заметно, что расхождения в среднем минимальны при азимутах близких к 180° , т.е. при южных положениях Солнца. Далее при направлении к востоку и западу они растут, причем перепад среднего отклонения составляет $1.5\text{--}2.0 \text{ мм}$. Уменьшение величины среднего отклонения при южном положении Солнца легко объяснить, т.к. когда фотометр смотрит на юг его значения ИСВП в целом повышаются за счет синоптического градиента абсолютной влажности.

5. ВЫВОДЫ

Проведено сравнение рядов интегрального содержания водяного пара по данным ГНСС и солнечных фотометров в Европе на 8 станциях.

Установлено, что среднее и стандартное отклонения рядов имеют явный сезонный ход. Среднее отклонение составило от -0.61 до 0.34 мм зимой и от 0.52 до 2.26 мм летом. В свою очередь, стандартное отклонение составило от 0.49 до 0.86 мм зимой и от 1.31 до 1.64 мм летом. В относительных величинах стандартное отклонение на большинстве станций во все сезоны составляет $5\text{--}6\%$ от величины интегрального содержания водяного пара. Стандартное отклонение растет в южном направлении.

Благодарности

Авторы выражают признательность Б. Холбену и его команде за возможность использования данных станции сети AERONET.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00863). Обработка данных выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mendes V.B.* Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques; Tech. Report № 199. New Brunswick, Canada: UNB, 1999. 353 p.
2. *Bastin S., Champollion C., Block O., Drobinski P., Masson F.* Diurnal cycle of water vapor as documented by a Dense GPS Network in a Coastal Area during ESCOMPTE IOP2 // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2007. V. 46. № 2. P. 167–182.
3. *Champollion C., Drobinski P., Haeffelin M., Bock O., Tarniewicz J., Bouin M.N., Vautard R.* Water vapour variability induced by urban/rural surface heterogeneities during convective conditions // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2009. V. 135. № 642. P. 1266–1276.
4. *Masoumi S., McClusky S., Koulali A. and Tregoning P.* A directional model of tropospheric horizontal gradients in Global Positioning System and its application for particular weather scenarios // *JGR.-Atmos.* 2017. V. 122. P. 4401–4425.
5. *Landskron D., Böhm J.* Refined discrete and empirical horizontal gradients in VLBI analysis // *J. Geodesy*. 2018. V. 92. № 12. P. 1387–1399.
6. *Kalinnikov V.V., Khutorova O.G., Teptin G.M.* Influence nonuniformity of the atmospheric water vapor field on the phase measurements of radio signals from global navigation satellite systems // *Radio-physics and Quantum Electronics*. 2013. V. 56. № 2. P. 96–103.
7. *Kalinnikov V.V., Khutorova O.G.* Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35. № 3. P. 453–464.
8. *Glowacki T.J., Penna N.T., Bourke W.P.* Validation of GPS-based estimates of integrated water vapour for the Australian region and identification of diurnal variability // *Aust. Met. Mag.* 2006. V. 55. № 2. P. 131–148.
9. *Heise S., Dick G., Gendt G., Schmidt T., Wickert J.* Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations: initial results from a global 5-min data set // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. № 7. P. 2851–2859.
10. *Haas R., Ning T., Elgered G.* Long-term trends in the amount of atmospheric water vapour derived from space geodetic and remote sensing techniques // *ESA Proceedings WPP 326*. Copenhagen, Denmark, 31 August–2 September 2011.
11. *Van Malderen R., Brenot H., Pottiaux E., Beirle S., Hermans C., De Maziere M., Wagner T., De Backer H., Bruyninx C.* A multi-site intercomparison of integrated water vapour observations for climate change analysis // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. № 8. P. 2487–2512.
12. *Li X., Zus F., Lu C., Dick G., Ning T., Ge M., Wickert J., Schuh H.* Retrieving of atmospheric parameters from multi-GNSS in real time: Validation with water vapor radiometer and numerical weather model // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. № 14. P. 7189–7204.
13. *Steinke S., Eikenberg S., Löhnert U., Dick G., Klocke D., Di Girolamo P., Crewell S.* Assessment of small-scale integrated water vapour variability during HOPE // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. № 5. P. 2675–2692.
14. *Kalinnikov V.V., Khutorova O.G.* The field of integrated water vapor over northeastern Siberia from the data of global navigation satellite systems // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. V. 41. № 10. P. 665–672.
15. *Kouba J.* A guide to using international GNSS service (IGS) products, May 2009 // *Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada*. URL: <http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>
16. *Xu G.* GPS. Theory, algorithms and applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
17. *Schaer S.* Mapping and predicting Earth's ionosphere using the Global Positioning System: dissertation. Bern: AIUB, 1999. 208 p.
18. *Niell A.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // *JGR*. 1996. V. 101. № B2. P. 3227–3246.
19. *Chen G., Herring T.A.* Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data // *JGR*. 1997. V. 102. № B9. P. 20489–20502.
20. *Bevis M., Businger S., Chiswell S., Herring T.A., Anthes R.A., Rocken C., Ware R.H.* GPS meteorology:

- mapping zenith wet delays onto precipitable water // *J. Appl. Meteor.* 1994. V. 33. № 3. P. 379–386.
21. *Saastamioinen J.* Contributions to then theory atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite Geodesy // *Bull. Geod.* 1973. № 107. P. 13–34.
 22. *Askne J., Nordius H.* Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data // *Radio Sci.* 1987. V. 22. № 3. P. 379–386.
 23. *Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Kostsov V.S., Ionov D.V., Kalinnikov V.V., Makarova M.V., Poberovsky A.V., Zaitsev N.A., Imhasin H.H., Polyakov A.V., Schneider M., Hase F., Barthlott S., Blumenstock T.* Quality assessment of integrated water vapour measurements at the St. Petersburg site, Russia: FTIR vs. MW and GPS techniques // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. № 11. P. 4521–4536.
 24. *Solheim F.S., Vivekanandan J., Ware R.H., Rocken C.* Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates // *JGR.-Atmos.* 1999. V. 104. № D8. P. 9663–9670.
 25. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 477 с.
 26. *Smirnov A., Holben B.N., Lyapustin A., Slutsker I., Eck T.F.* AERONET processing algorithms refinement // *AERONET Workshop.* El Arenosillo, Spain. May 10–14, 2004.
 27. *Rueger J.M.* Refractive indices of light, infrared and radio waves in the atmosphere; UNISURV Report S-68. Sydney: UNSW, 2002. 104 p.
 28. *Sapucci L., Machado L., Monico J., Plana-Fattori A.* Intercomparison of Integrated Water Vapor Estimates from Multisensors in the Amazonian Region // *Journal of atmospheric and oceanic technology.* 2007. V. 24. № 11. P. 1880–1894.
 29. *Berezin I.A., Timofeyev Yu.M., Virolainen Ya.A., Frantsuzova I.S., Volkova K.A., Poberovsky A.V., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I.* Error analysis of integrated water vapor measured by CIMEL photometer // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. V. 53. № 1. P. 58–64.
 30. *Li, X., Zus F., Lu C., Dick G., Ning T., Ge M., Wikkert J., Schuh H.* Retrieving of atmospheric parameters from multi-GNSS in real time: Validation with water vapor radiometer and numerical weather model // *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2015. V. 120. № 14. P. 7189–7204.

Validation of GNSS Data about the Integrated Water Vapor in Europe Using Sun Photometers

V. V. Kalinnikov*, O. G. Khutorova

*Kazan (Volga Region) Federal University
Kremlevskaya St., 18, Kazan, 420008, Russia
e-mail: Vlad-kalinnikov@mail.ru*

Received: 19.11.2018

Accepted: 03.04.2019

In the article the comparison of time series of integrated water vapor (IWV) for 2015–2017 at 8 pair stations of GNSS and solar photometers of AERONET network in Europe is carried out. The distance between pairs of stations didn't exceed 20 km. It is shown that bias and standard deviations of divergences have the seasonal course. In the winter GNSS-photometer bias was from -0.61 to 0.34 mm. In the summer the GNSS overestimates IWV relative to photometers by values from 0.52 to 2.26 mm. The standard deviation is maximal in summer and is from 1.31 to 1.64 mm, in winter it decreases to 0.49 – 0.86 mm that is 5–6% of IWV.

Keywords: global navigation satellite systems, sun photometer, integrated water vapor.