

Некоторые закономерности градиентных параметров тропосферной задержки сигналов ГНСС в Европе

В. В. Калинин^{1,2}, О. Г. Хуторова¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия
E-mail: vlad-kalinnikov@mail.ru

² Университет Иннополис, Иннополис, 420500, Россия

В статье рассмотрены градиентные параметры тропосферных задержек по данным станций ГНСС в Европе. Установлено, что горизонтальный масштаб градиентных параметров составляет порядка 50 км. Простая линейная эмпирическая модель вида $\partial ZTD/\partial l = aG + b$ между градиентом зенитной тропосферной задержки ZTD и градиентным параметром G даёт на годовом уровне значение $a \approx 0,21 \text{ км}^{-1}$. В свою очередь, значения коэффициента b имеют порядок 0,01 мм/км и, видимо, отражают систематические ошибки оценок тропосферных продуктов. Вектор градиентного параметра в Европе обычно указывает в юго-восточном направлении. Сезонные вариации северной и восточной компонент градиентного параметра максимальны летом и минимальны зимой. Гидростатическая компонента составляет в среднем по Европе около 34 % летом и 59 % зимой от величины полного градиентного параметра. Вектор гидростатической компоненты повернут в среднем левее относительно вектора полного градиентного параметра на 10° летом и 18° зимой. Сезонные вариации гидростатической компоненты в северном и восточном направлениях составляют 33 и 28 % летом, 88 и 69% зимой относительно соответствующих составляющих вариаций полного градиентного параметра.

Ключевые слова: ГНСС, тропосферная задержка, градиенты

Одобрена к печати: 01.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-60-71

Введение

Использование продуктов зондирования тропосферы сигналами ГНСС (Глобальные навигационные спутниковые системы, GNSS — Global Navigation Satellite System) в метеорологических приложениях получило широкое признание (Guerova et al., 2016). К ним относятся зенитная тропосферная задержка (zenith tropospheric delay — ZTD) и градиентные параметры, моделирующие горизонтальные неоднородности вокруг станции (Kasmaric et al., 2017). Последние широко используются для повышения точности анализа данных ГНСС и РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) (Ahn et al., 2007; Bar-Sever et al., 1998; Boehm, Schuh, 2007; Elsobeiey, El-Diasty, 2016; Landskron, Böhm, 2018; Lu et al., 2016; Meindl et al., 2004; Miyazaki et al., 2003; Xu et al., 2015; Zhou et al., 2017). Вместе с тем вопрос природы градиентных параметров остаётся недостаточно изученным. В работе (Bar-Sever et al., 1998) на основе сравнения градиентных параметров из данных ГНСС и данных сканирующего радиометра на станции ONSA (Онсала, Швеция) было сделано предположение, что гидростатическая и влажная части градиентных параметров сопоставимы по величине. Далее, авторы исследования (Meindl et al., 2004) нашли, что отчасти направление градиентных параметров обусловлено сплюснутостью Земли у полюсов. В работе (Boehm, Schuh, 2007) отмечено, что эффективная высота гидростатической компоненты градиентного параметра больше, чем влажной. Наконец, авторы публикации (Morel et al., 2015) отмечают, что направление градиентных параметров на о. Корсика может быть обусловлено наклоном локальной топографии. Настоящее исследование фокусируется на продолжении выявления некоторых природных закономерностей, которые влияют на значения градиентных параметров.

Модель тропосферных задержек

Индекс рефракции в тропосфере связан с метеорологическими параметрами следующим образом (Bevis et al., 1994):

$$N = k_1 \frac{R_0}{M} \times 10^{-2} \times \rho + \left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}, \quad (1)$$

где ρ и T — плотность (кг/м^3) и температура (К) воздуха; e — давление водяного пара (гПа); k_1-k_3 — численные коэффициенты, $k_1 = 77,60 \text{ К/гПа}$; $k_2 = 70,4 \text{ К/гПа}$; $k_3 = 373900 \text{ К}^2/\text{гПа}$; M — молярная масса воздуха, $M = 0,0289644 \text{ кг/моль}$; M_w — молярная масса водяного пара, $M_w = 0,0180152 \text{ кг/моль}$; R_0 — универсальная газовая постоянная, $R_0 = 8,31434 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$. Наклонная тропосферная задержка радиосигналов ГНСС, обусловленная индексом рефракции, обычно представляется следующим образом (Kačmařík et al., 2017):

$$\text{STD} = \text{ZTD} \cdot m(z) + Gm_G(z), \quad (2)$$

где m и m_G — картирующие функции для зенитной тропосферной задержки ZTD и градиентного параметра G в направлении соответствующего спутника (Chen, Herring, 1997; Niell, 1996); z — зенитный угол спутника. Градиентный параметр G в направлении спутника с азимутом A , согласно планарной модели, распадается на градиентные параметры северного G_n и восточного G_e направлений:

$$G = G_n \cos(A) + G_e \sin(A). \quad (3)$$

В новейших исследованиях предлагаются градиентные модели с большим числом компонент (Landskron, Böhm, 2018; Masoumi et al., 2017). Тем не менее в данной работе мы будем придерживаться классической планарной модели. Поскольку первое слагаемое в формуле индекса рефракции пропорционально плотности воздуха, а вторые два — давлению водяного пара, то зенитную тропосферную задержку и градиентный параметр можно также разделить на гидростатическую компоненту (zenith hydrostatic delay — ZHD, $G_h = \{G_{hn}, G_{he}\}$) и влажную (zenith wet delay — ZWD, $G_w = \{G_{wn}, G_{we}\}$). Если предположить, что индекс рефракции тропосферы N имеет некоторый постоянный горизонтальный градиент значительной протяженности в некотором направлении l , то тогда отношение между градиентным параметром G и градиентом ZTD в этом направлении можно выразить следующим образом (Chen, Herring, 1997):

$$a^{-1} = \frac{G}{\partial \text{ZTD} / \partial l} = \frac{\int_0^\infty h \frac{\partial N}{\partial l} dh}{\int_0^\infty \frac{\partial N}{\partial l} dh}. \quad (4)$$

Здесь h — текущая высота. Параметр a^{-1} имеет размерность длины и, исходя из выражения (4), может рассматриваться как средневзвешенная высота.

Данные и методика их обработки

Нами отобраны данные за 2015–2017 гг. с 24 станций международной службы ГНСС (IGS — International GNSS Service, занимается сбором, хранением и обработкой данных GNSS) (рис. 1, красные точки, см. с. 62). Для вспомогательных целей мы привлекли данные ещё с пяти станций (рис. 2, синие точки, см. с. 62). Три дополнительные станции (KOZL в Козловке, Чувашия; EAOZ, Астрономическая обсерватория им. В. П. Энгельгардта, Татарстан; СНЕВ в Чебоксарах, Чувашия) входят в локальную сеть высокоточного позиционирования в режиме RTK (Real Time Kinematic — «кинематика реального времени»). Измерения с дополнительных станций BOGI (Ядвисин, Польша) и WARE (Варем, Бельгия) нами получены с сервера сети EUREF Permanent GNSS Network (EPN).

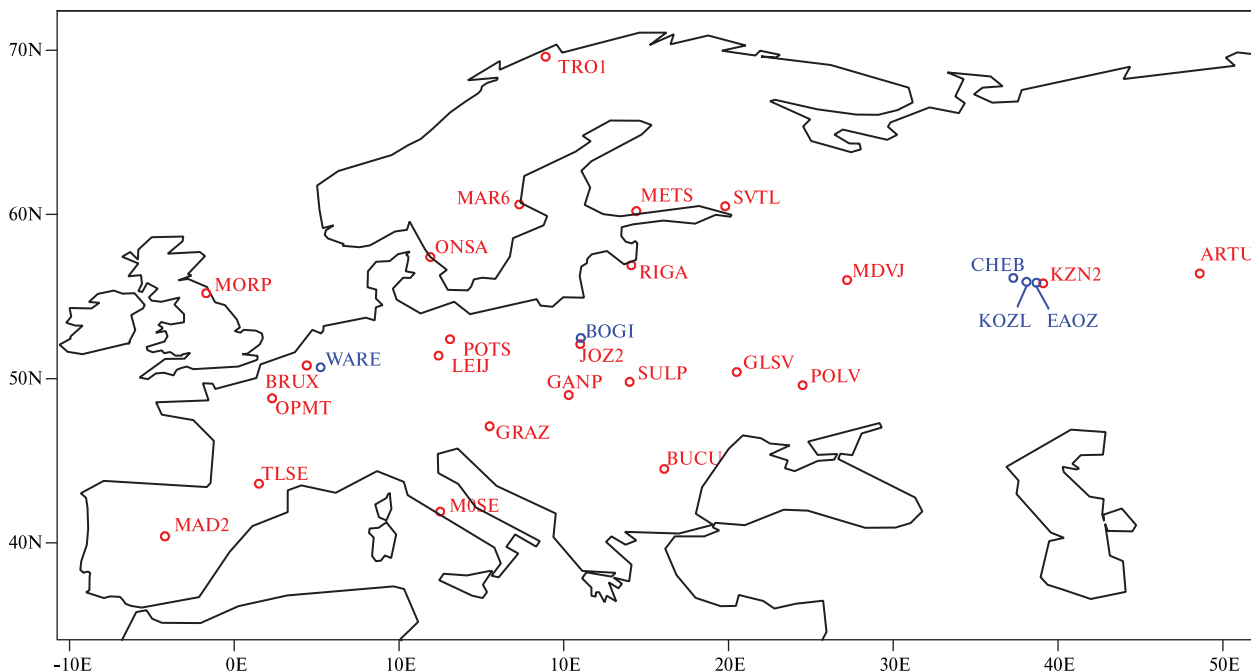


Рис. 1. Станции ГНСС, использованные в исследовании

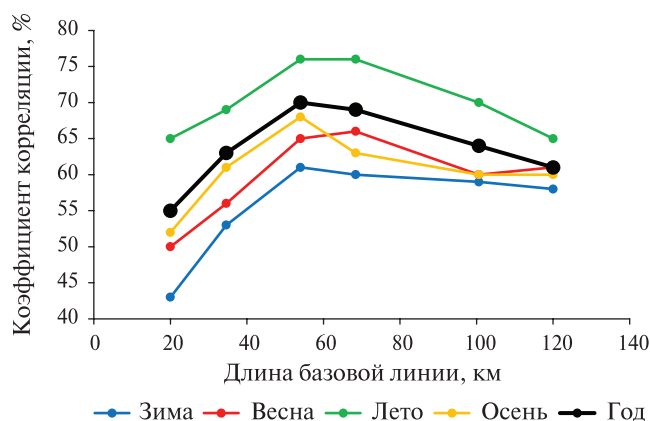


Рис. 2. Коэффициент корреляции градиента ZTD между концами базовой линии с градиентным параметром как функция длины базовой линии

Обработка измерений проводилась методом Precise Point Positioning (PPP, высокоточное позиционирование одиночной станции) в приложении TropoGNSS, разработанном в Казанском университете. Метод PPP основывается на сравнении измеренных кодовых и фазовых дальностей между приёмником и спутниками с геометрическими расстояниями между ними (Ху, 2007). Наклонные задержки радиоволн в тропосфере моделируются согласно формулам (2) и (3). Оценки всех неизвестных выполнены с шагом 5 мин.

Сравнение тропосферных продуктов ГНСС с данными ERA-Interim показало согласие на уровне 10–16 мм для ZTD и 0,3–0,4 мм — для градиентных параметров (Douša et al., 2017; Li et al., 2015). В отношении сравнений данных ГНСС с данными СВЧ-радиометров стоит подчеркнуть, что согласно работе (Steinke et al., 2015) разнесение датчиков на 10 км приводит к расхождениям их показаний из-за горизонтальных неоднородностей на уровне 0,6 мм интегрального содержания водяного пара (эквивалентно 3,6 мм ZTD). Поэтому имеют смысл те исследования, где ГНСС и радиометр располагались непосредственно рядом друг с другом, например работы (Li et al., 2015; Virolainen et al., 2017). В них показано, что стандартное и среднеквадратическое отклонения расхождений между данными ГНСС и радиометра имеют порядок 1 мм интегрального содержания водяного пара (около 6 мм ZTD).

Эмпирическая модель связи между градиентом ZTD и градиентным параметром

Существует представление, что горизонтальный масштаб, который отражают градиентные параметры, меньше 100–200 км (Aonashi et al., 2000; Meindl et al., 2004). Для более точной оценки мы использовали данные с четырёх станций ГНСС (KZN2 в Казани, EAOZ, KOZL, СНЕВ). Они позволяют сформировать базовые линии с длинами 20, 35, 54, 68, 101 и 120 км. Далее, для каждой базовой линии рассматривалась корреляция градиента ZTD между концами базовой линии с градиентным параметром G , вычисленным по направлению базовой линии согласно формуле (3). Поскольку мы имеем два значения градиентного параметра на каждом из концов базовой линии, в корреляционном анализе рассматривалось среднее из них. Результат показан на *рис. 2*. Как видно, коэффициент корреляции отслеживает максимум на годовом уровне на базовой линии 54 км. Из полученного результата и выражения (4) следует, что вычисление параметра a по прямым значениям градиента ZTD и градиентного параметра G будет корректным, если исходный горизонтальный масштаб (∂l) положить равным примерно 50 км. Кроме того, поскольку в оценках ZTD и G могут присутствовать систематические ошибки, то логично построить регрессионную модель со свободным членом:

$$\frac{\partial ZTD}{\partial l} = aG + b. \quad (5)$$

Для нахождения численных значений коэффициентов мы использовали данные трёх базовых линий, близких по длине к 50 км: BOGI-JOZ2 (42 км) (JOZ2 — в Юзефославе, Польша), KZN2-KOZL (54 км), BRUX-WARE (64 км) (BRUX — в Брюсселе). Как и ранее, в расчётах были использованы средние значения градиентных параметров между концами базовой линии. Чтобы разница между высотным положением концов базовой линии ΔH не влияла на результат вычисления градиента ZTD, мы из значений ZTD с нижележащей станции вычитали поправку $N \cdot \Delta H$. Индекс рефракции N в данном случае вычислялся по формуле (1) с использованием приземных метеорологических данных. Отметим также, что максимальное значение ΔH для рассматриваемых базовых линий составляет 29 м. Посчитанные методом наименьших квадратов значения коэффициентов a и b и их доверительные интервалы (3σ) приведены в *таблице*.

Коэффициенты регрессионной модели

Базовая линия	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
$a, \text{ км}^{-1}$					
KZN2-KOZL	0,125±0,002	0,197±0,003	0,258±0,002	0,190±0,002	0,213±0,001
BOGI-JOZ2	0,140±0,003	0,193±0,003	0,249±0,003	0,207±0,003	0,207±0,001
BRUX-WARE	0,179±0,002	0,184±0,003	0,251±0,002	0,205±0,002	0,215±0,001
$b, \text{ мм/км}$					
KZN2-KOZL	-0,034±0,001	-0,029±0,001	-0,013±0,001	-0,038±0,001	-0,029±0,001
BOGI-JOZ2	-0,008±0,002	0,005±0,002	0,054±0,002	0,025±0,002	0,022±0,001
BRUX-WARE	0,006±0,001	0,012±0,001	0,006±0,002	0,020±0,001	0,012±0,001
Коэффициент корреляции, %					
KZN2-KOZL	61	66	76	68	70
BOGI-JOZ2	51	60	68	67	63
BRUX-WARE	62	60	74	68	69

Значения коэффициента a близки для всех базовых линий, коэффициент b , напротив, показывает довольно значительные различия. Коэффициент корреляции всегда больше 50 %

с максимумом летом. Поскольку градиентный параметр и градиент ZTD можно разделить на гидростатическую и влажную компоненты, то найденные значения коэффициентов являются средневзвешенными между соответствующими коэффициентами для каждой из компонент, т.е., к примеру, $a = (a_h G_h + a_w G_w)/(G_h + G_w)$. Можно дать теоретическую оценку коэффициента a_h . Как известно, в условиях гидростатического равновесия изотропной атмосферы плотность воздуха изменяется с высотой по следующему закону (Matveev, 1967):

$$\rho = \rho_s \left(1 - \frac{\gamma h}{T_s}\right)^{\beta-1}, \quad (6)$$

где β — численный параметр, $\beta = M(g/R_0)\gamma \approx 5,4$; ρ_s и T_s — приземные плотность и температура; γ — вертикальный градиент температуры, $\gamma = 0,0063$ К/м; g — ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с². Подставляя (6) в (1) и полагая атмосферу сухой ($e = 0$), получим высотный профиль гидростатической части индекса рефракции. Далее, предположив наличие только градиента плотности (но не температуры), подставим этот профиль в выражение (4), заменив предел интегрирования с бесконечности на высоту изотропной атмосферы (T_s/γ). В результате найдём:

$$a_h^{-1} = H_b \frac{\beta}{\beta+1}, \quad (7)$$

где $H_b = (R_0 T_s)/M \cdot g$. При $T_s = 273$ К, соответственно, получим $H_b = 8$ км и $a_h = 0,102$ км⁻¹, что близко к зимним значениям коэффициента a из *таблицы*. Действительно, поскольку масштаб высоты гидростатического градиента больше, чем у влажного, то, следуя выражению (4), можно заключить, что $a_h < a_w$. Зимой, когда в тропосфере мало содержание водяного пара, $a \approx a_h$. С увеличением содержания водяного пара в тёплое время коэффициент a начинает расти за счёт a_w , что мы и видим в данных *таблицы*. Значения коэффициента b объясняются систематическими ошибками: если предположить, что разность ZTD между концами базовой линии имеет систематическую ошибку в 1 мм, то это даёт систематическую ошибку $\partial ZTD/\partial l \approx 1$ мм/50 км = 0,02 мм/км.

Внутрисезонные вариации градиентных параметров

Средние сезонные значения градиентных параметров и их внутрисезонные вариации показаны на *рис. 3* и *4* (см. с. 65). Станции расположены в порядке убывания широты. Северный градиентный параметр на большинстве станций имеет отрицательное значение. Восточный градиентный параметр показывает немного меньшую магнитуду, но тоже обычно имеет отрицательное значение. Следовательно, полный градиентный параметр обычно направлен в юго-западном направлении. Это в целом совпадает с выводами авторов работ (Kalinnikov et al., 2013; Meindl et al., 2004). Величина годового хода не превысила 0,39 мм для северного градиентного параметра и 0,35 мм — для восточного. Фаза годичного хода различна. Можно лишь отметить, что северный градиентный параметр наиболее выражен не в переходные периоды, т.е. либо зимой, либо летом. Восточный градиентный параметр на многих станциях летом наименее отрицателен, а на некоторых и вовсе встречаются положительные значения. Внутрисезонные вариации градиентных параметров, как правило, превышают среднесезонные значения. Имеется явный сезонный ход: наибольшие вариации наблюдаются летом, а наименьшие — зимой.

Вклад гидростатического градиента в величину градиентных параметров

Для того чтобы получить представление о величине гидростатической компоненты градиентного параметра, мы привлекли данные о давлении и температуре в приземном слое из численных погодных полей ERA-Interim (Dee et al., 2011). Используются поля разрешением 0,5°

за период 2015–2017 гг. Такой шаг сетки соответствует 55 км для широты. Для долготы линейные размеры шага сетки варьируются в пределах изучаемой области от 19 км на севере до 42 км на юге. Для каждой станции применялись данные с ближайшего к станции узла, а также с соседних в северном и восточном направлениях. На каждом из узлов гидростатическим способом выполнялась редукция давления с уровня модельной орографии на уровень станции. По этим данным мы оцениваем гидростатическую компоненту ZHD согласно модели Саастамойнена (Saastamioinen, 1973). Далее мы вычисляли значения гидростатических компонент градиентных параметров:

$$G_{hn} = \frac{1}{a_h} \cdot \frac{\partial ZHD}{\partial n}, \quad G_{he} = \frac{1}{a_h} \cdot \frac{\partial ZHD}{\partial e}. \quad (8)$$

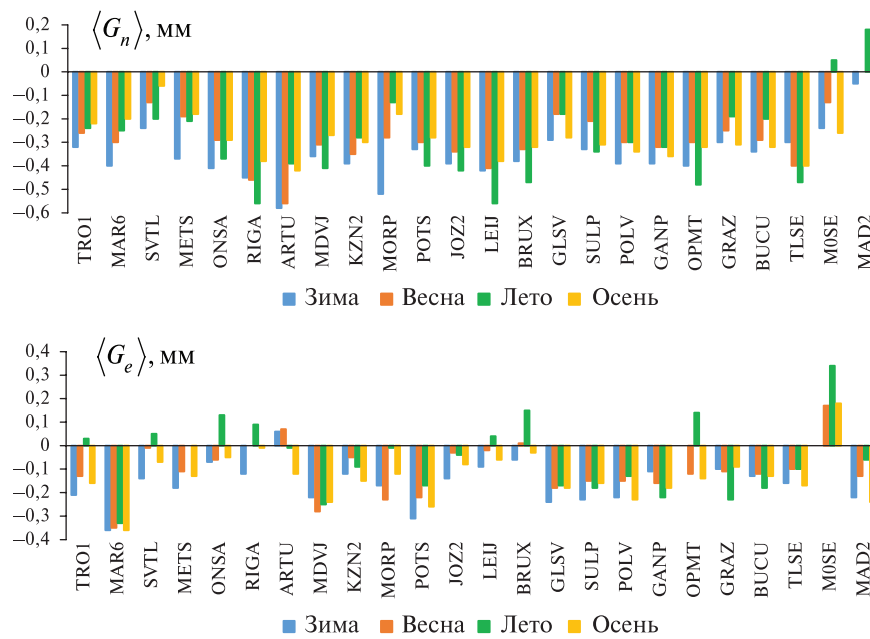


Рис. 3. Средние сезонные значения градиентных параметров

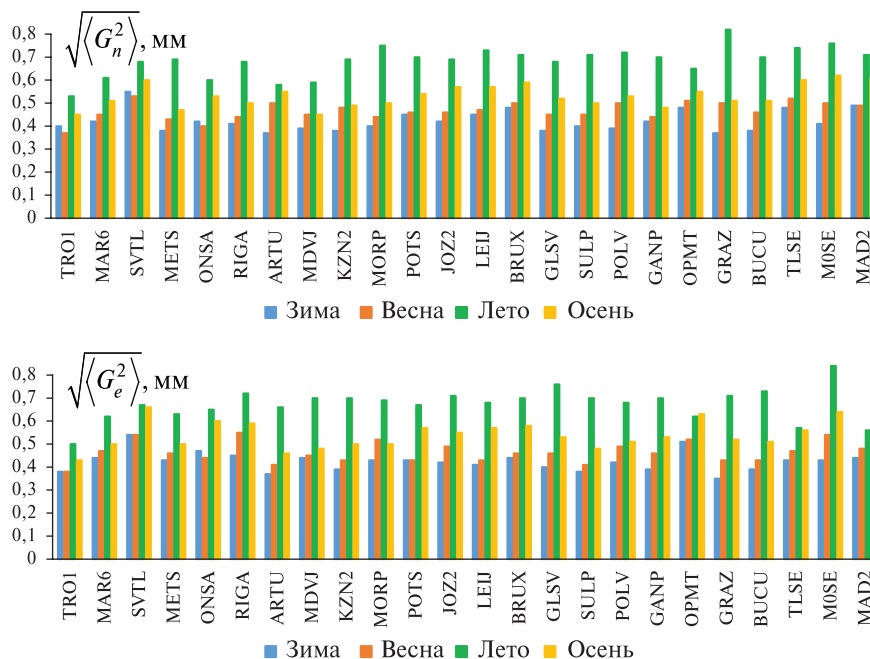


Рис. 4. Внутрисезонные вариации градиентных параметров

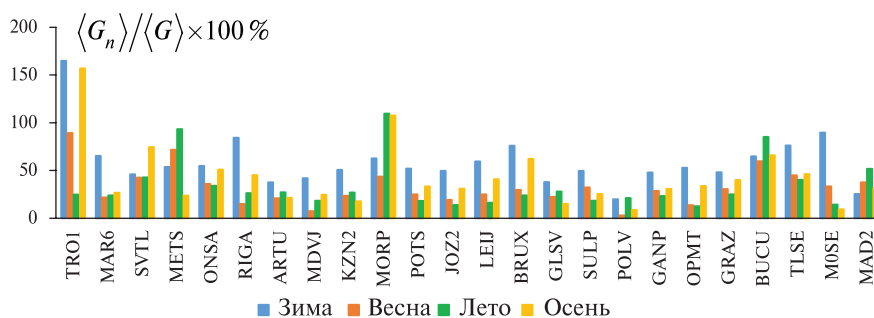


Рис. 5. Отношение сезонных значений гидростатического и полного градиентного параметров

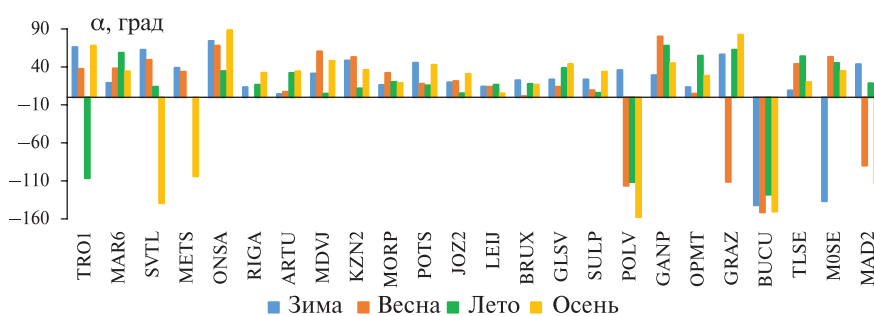


Рис. 6. Угол между направлениями сезонных полного и гидростатического градиентных параметров

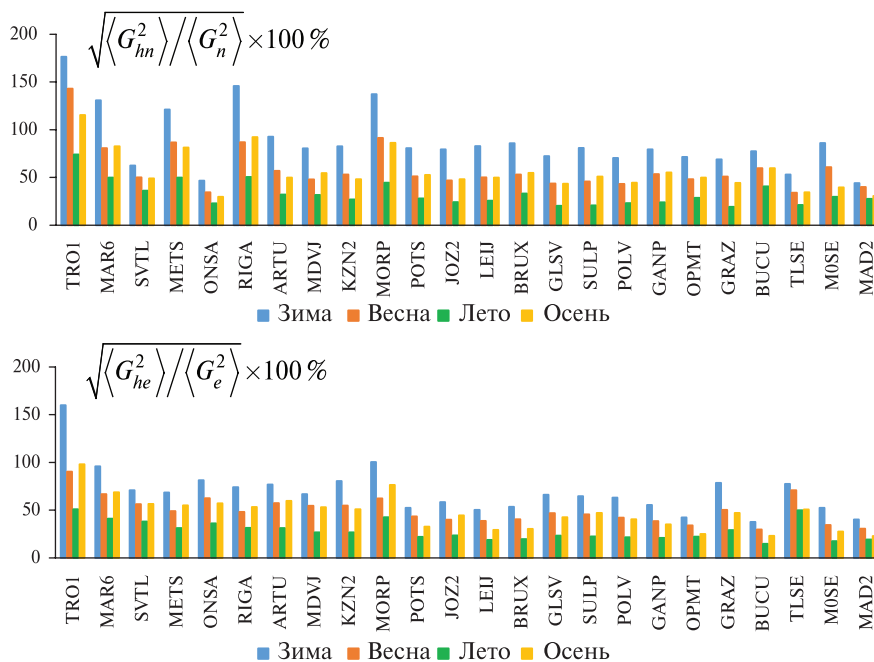


Рис. 7. Отношение сезонных вариаций гидростатического градиентного параметра к сезонным вариациям полного градиентного параметра

Для самых северных станций, где линейные размеры шага сетки по долготе менее 25 км, при вычислении G_{he} использован двойной шаг. Коэффициент a_h был положен равным $0,102 \text{ км}^{-1}$. На рис. 5 показано отношение сезонных значений гидростатического и полного градиентного параметров. Гидростатическая компонента составляет в среднем около 34 % летом и 59 % зимой от величины полного градиентного параметра. На северной стан-

ции TRO1 (Тромсё, Норвегия) данный показатель достигает 165 %. Это говорит о том, что гидростатический и влажный градиенты в полном градиентном параметре частично компенсируют друг друга. На *рис. 6* (см. с. 66) показаны углы, на которые вектор гидростатической компоненты отклоняется от вектора полного градиентного параметра. При $\alpha > 0$ гидростатический градиентный параметр повёрнут влево относительно полного. В среднем этот угол равен 18° зимой и 10° летом. На *рис. 7* (см. с. 66) показан процент, который составляют сезонные вариации компонент гидростатического градиентного параметра относительно вариаций полного градиентного параметра. Наибольший процент приходится на зиму. В среднем отношение вариаций равно 88 и 69 % для северной и восточной компонент зимой и 33 и 28 % — летом. Отметим, что нельзя рассматривать вариации гидростатического и влажного градиентных параметров как независимые. Иными словами, мы не можем считать, что доля вариации влажной компоненты от вариации полного градиентного параметра равна 100 % минус доля гидростатической вариации. Хорошо известно, что, как правило, с антициклонами связаны области пониженной влажности, а с циклонами — повышенной. Гидростатический градиент, смотрящий в область с повышенным давлением, противоположен по направлению влажному градиенту. Вследствие этого вариации полного градиентного параметра носят отчасти компенсированный характер.

Выводы

В результате проведённого исследования было установлено, что средний масштаб градиентов ZTD, который отражают градиентные параметры, составляет порядка 50 км. Корреляция между градиентом ZTD на этом масштабе и градиентным параметром во все сезоны превосходит 50 % и имеет максимум летом. Простая линейная эмпирическая модель вида $\partial ZTD/\partial l = aG + b$ даёт устойчивое значение $a \approx 0,21 \text{ км}^{-1}$ на годовом уровне. Значения коэффициента b имеют порядок 0,01 мм/км и связаны с систематическими ошибками. Коэффициент a минимален зимой и максимален летом. Его зимнее значение немного больше гидростатического, которое оценено в $0,102 \text{ км}^{-1}$.

Годовой вектор градиентного параметра в Европе обычно указывает в юго-восточном направлении. Сезонная зависимость выражена слабо. Сезонные вариации северной и восточной компонент градиентного параметра максимальны летом и минимальны зимой. Гидростатическая компонента градиентного параметра составляет в среднем по Европе около 34 % летом и 59 % зимой от величины полного градиентного параметра. Вектор гидростатической компоненты повёрнут в среднем левее относительно вектора полного градиентного параметра на 10° летом и 18° зимой. Сезонные вариации гидростатической компоненты в северном и восточном направлениях составляют 33 и 28 % летом, 88 и 69 % зимой относительно соответствующих составляющих вариаций полного градиентного параметра.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 17-05-00863). Обработка измерений ГНСС 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. Ahn Y. W., Kim D., Dare P. Positioning impacts from imbalanced atmospheric GPS network errors // Proc. 20th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Fort Worth, TX, USA, 2007. P. 2302–2312.
2. Aonashi K., Shoji Y., Ichikawa R., Hanado K. Estimation of PWC gradients over the Kanto Plain using GPS data: Validation and possible meteorological implications // Earth Planets and Space. 2000. V. 52. P. 907–912. DOI: 10.1186/BF03352304.

3. *Bar-Sever Y. E., Kroger P. M., Borjesson J. A.* Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1998. V. 103. P. 5019–5035. DOI: 10.1029/97JB03534.
4. *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. Applied Meteorology*. 1994. V. 33. P. 379–386. DOI: 10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2.
5. *Boehm J., Schuh H.* Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis // *J. Geodesy*. 2007. V. 81. P. 403–408. DOI: 10.1007/s00190-007-0144-2.
6. *Chen G., Herring T. A.* Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. V. 102. P. 20489–20502. DOI: 10.1029/97JB01739.
7. *Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Holm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137. P. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.
8. *Douša J., Vaclavovic P., Elias M.* Tropospheric products of the second GOP European GNSS reprocessing (1996–2014) // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10. P. 3589–3607. DOI: 10.5194/amt-10-3589-2017.
9. *Elsobeiey M., El-Diasty M.* Impact of Tropospheric Delay Gradients on Total Tropospheric Delay and Precise Point Positioning // *Intern. J. Geosciences*. 2016. V. 7. P. 645–654. DOI: 10.4236/ijg.2016.75050.
10. *Guerova G., Jones J., Douša J., Dick G., de Haan S., Pottiaux E., Bock O., Pacione R., Elgered G., Vedel H., Bender M.* Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016. V. 9. P. 5385–5406. DOI: 10.5194/amt-9-5385-2016.
11. *Kačmařík M., Douša J., Dick G., Zus F., Brenot H., Möller G., Pottiaux E., Kapłon J., Hordyniec P., Václavovic P., Morel L.* Inter-technique validation of tropospheric slant total delays // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10. P. 2183–2208. DOI: 10.5194/amt-10-2183-2017.
12. *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 // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2013. V. 56. P. 88–94. DOI: 10.1007/s11141-013-9418-0.
13. *Landskron D., Böhm J.* Refined discrete and empirical horizontal gradients in VLBI analysis // *J. Geodesy*. 2018. V. 92. P. 1387–1399. DOI: 10.1007/s00190-018-1127-1.
14. *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. Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. V. 120. P. 7189–7204. DOI: 10.1002/2015JD023454.
15. *Lu C., Li X., Li Z., Heinkelmann R., Nilsson T., Dick G., Ge M., Schuh H.* GNSS tropospheric gradients with high temporal resolution and their effect on precise positioning // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. V. 121. P. 912–930. DOI: 10.1002/2015JD024255.
16. *Masoumi S., McClusky S., Koulali A., Tregoning P.* A directional model of tropospheric horizontal gradients in Global Positioning System and its application for particular weather scenarios // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. V. 122. P. 4401–4425. DOI: 10.1002/2016JD026184.
17. *Matveev L. T.* Fundamentals of general meteorology: physics of the atmosphere. Jerusalem, Israel: Program for Scientific Translations, 1967. 699 p.
18. *Meindl M., Schaer S., Hugentobler U., Beutler G.* Tropospheric gradient estimation at CODE: Results from global solutions // *J. Meteorological Society of Japan*. 2004. V. 82. P. 331–338. DOI: 10.2151/jmsj.2004.331.
19. *Miyazaki S., Iwabuchi T., Heki K., Naito I.* An impact of estimating tropospheric delay gradients on precise positioning in the summer using the Japanese nationwide GPS array // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. V. 108. P. 2335–2351. DOI: 10.1029/2000JB000113.
20. *Morel L., Pottiaux E., Durand F., Fund F., Boniface K., de Oliveira P.-S., Van Baelen J.* Validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS in Corsica // *Advances in Space Research*. 2015. V. 55. P. 135–149. DOI: 10.1016/j.asr.2014.10.004.
21. *Niell A.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1996. V. 101. P. 3227–3246. DOI: 10.1029/95JB03048.
22. *Saastamioinen J.* Contributions to the theory atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite Geodesy // *Bull. Géodésique*. 1973. V. 107. P. 13–34. DOI: 10.1007/BF02522083.
23. *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 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015. V. 15. P. 2675–2692. DOI: 10.5194/acp-15-2675-2015.

24. 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 // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10. P. 4521–4536. DOI: 10.5194/amt-10-4521-2017.
25. Xu G. GPS. Theory, algorithms and applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p. DOI: 10.1007/978-3-540-72715-6.
26. Xu Y., Jiang N., Xu G., Yang Y., Schuh H. Influence of meteorological data and horizontal gradient of tropospheric model on precise point positioning // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. P. 2374–2383.
27. Zhou F., Li X., Li W., Chen W., Dong D., Wickert J., Schuh H. The Impact of Estimating High-Resolution Tropospheric Gradients on Multi-GNSS Precise Positioning // *Sensors*. 2017. V. 17. P. 756–768. DOI: 10.3390/s17040756.

Some regularities of gradient parameters of GNSS tropospheric delay in Europe

V. V. Kalinnikov^{1,2}, O. G. Khutorova¹

¹ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan 420008, Russia
E-mail: vlad-kalinnikov@mail.ru

² Innopolis University, Innopolis 420500, Russia

The paper considers gradient parameters of tropospheric delays derived from the data of GNSS stations in Europe. It is established that the horizontal scale of the gradient parameters is about 50 km. A simple linear empirical model of the form $\partial ZTD/\partial l = a \cdot G + b$ between the gradient of ZTD and the gradient parameter G gives a stable value $a \approx 0.21 \text{ km}^{-1}$ at the annual level. In turn, the values of the coefficient b are of the order of 0.01 mm/km and apparently reflect the systematic errors in the estimates of tropospheric products. The vector of the gradient parameter in Europe usually points to south-east. Seasonal variations of the northern and eastern components of the gradient parameter are maximal in summer and minimal in winter. On average in Europe the hydrostatic component is about 34 % of total gradient parameter in summer and 59 % in winter. The vector of the hydrostatic component is turned on the average to the left relative to the vector of the total gradient parameter by 10 degrees in summer and 18 degrees in winter. Seasonal variations of the hydrostatic components in the northern and eastern directions are 33 and 28 % in summer and 88 and 69 % in winter relative to the corresponding components of total gradient parameter variations.

Keywords: GNSS, tropospheric delay, gradients

Accepted: 01.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-60-71

References

1. Ahn Y. W., Kim D., Dare P., Positioning impacts from imbalanced atmospheric GPS network errors, *Proc. 20th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Fort Worth, TX, USA, 2007, pp. 2302–2312.
2. Aonashi K., Shoji Y., Ichikawa R., Hanado K., Estimation of PWC gradients over the Kanto Plain using GPS data: Validation and possible meteorological implications, *Earth Planets and Space*, 2000, Vol. 52, pp. 907–912, DOI: 10.1186/BF03352304.
3. Bar-Sever Y. E., Kroger P. M., Borjesson J. A., Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, Vol. 103, pp. 5019–5035, DOI: 10.1029/97JB03534.

4. 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. Applied Meteorology*, 1994, Vol. 33, pp. 379–386, DOI: 10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2.
5. Boehm J., Schuh H., Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis, *J. Geodesy*, 2007, Vol. 81, pp. 403–408, DOI: 10.1007/s00190-007-0144-2.
6. Chen G., Herring T.A., Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, Vol. 102, pp. 20489–20502, DOI: 10.1029/97JB01739.
7. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2011, Vol. 137, pp. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
8. Douša J., Vaclavovic P., Elias M., Tropospheric products of the second GOP European GNSS reprocessing (1996–2014), *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, Vol. 10, pp. 3589–3607, DOI: 10.5194/amt-10-3589-2017.
9. Elsobeiey M., El-Diasty M., Impact of Tropospheric Delay Gradients on Total Tropospheric Delay and Precise Point Positioning, *Intern. J. Geosciences*, 2016, Vol. 7, pp. 645–654, DOI: 10.4236/ijg.2016.75050.
10. Guerova G., Jones J., Douša J., Dick G., de Haan S., Pottiaux E., Bock O., Pacione R., Elgered G., Vedel H., Bender M., Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, Vol. 9, pp. 5385–5406, DOI: 10.5194/amt-9-5385-2016.
11. Kačmařík M., Douša J., Dick G., Zus F., Brenot H., Möller G., Pottiaux E., Kapłon J., Hordyniec P., Vaclavovic P., Morel L., Inter-technique validation of tropospheric slant total delays, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, Vol. 10, pp. 2183–2208, DOI: 10.5194/amt-10-2183-2017.
12. 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, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2013, Vol. 56, pp. 88–94, DOI: 10.1007/s11141-013-9418-0.
13. Landskron D., Böhm J., Refined discrete and empirical horizontal gradients in VLBI analysis, *J. Geodesy*, 2018, Vol. 92, pp. 1387–1399, DOI: 10.1007/s00190-018-1127-1.
14. 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. Geophysical Research. Atmospheres*, 2015, Vol. 120, pp. 7189–7204, DOI: 10.1002/2015JD023454.
15. Lu C., Li X., Li Z., Heinkelmann R., Nilsson T., Dick G., Ge M., Schuh H., GNSS tropospheric gradients with high temporal resolution and their effect on precise positioning, *J. Geophysical Research. Atmospheres*, 2016, Vol. 121, pp. 912–930, DOI: 10.1002/2015JD024255.
16. Masoumi S., McClusky S., Koulali A., Tregoning P., A directional model of tropospheric horizontal gradients in Global Positioning System and its application for particular weather scenarios, *Geophysical Research. Atmospheres*, 2017, Vol. 122, pp. 4401–4425, DOI: 10.1002/2016JD026184.
17. Matveev L.T., *Fundamentals of general meteorology: physics of the atmosphere*, Jerusalem, Israel: Program for Scientific Translations, 1967, 699 p.
18. Meindl M., Schaer S., Hugentobler U., Beutler G., Tropospheric gradient estimation at CODE: Results from global solutions, *J. Meteorological Society of Japan*, 2004, Vol. 82, pp. 331–338, DOI: 10.2151/jmsj.2004.331.
19. Miyazaki S., Iwabuchi T., Heki K., Naito I., An impact of estimating tropospheric delay gradients on precise positioning in the summer using the Japanese nationwide GPS array, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, Vol. 108, pp. 335–2351, DOI: 10.1029/2000JB000113.
20. Morel L., Pottiaux E., Durand F., Fund F., Boniface K., de Oliveira P.-S., Van Baelen J., Validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS in Corsica, *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 55, pp. 135–149, DOI: 10.1016/j.asr.2014.10.004.
21. Niell A., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, Vol. 101, pp. 3227–3246, DOI: 10.1029/95JB03048.
22. Saastamoinen J., Contributions to then theory atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite Geodesy, *Bull. Géodésique*, 1973, Vol. 107, pp. 13–34, DOI: 10.1007/BF02522083.
23. 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, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, Vol. 15, pp. 2675–2692, DOI: 10.5194/acp-15-2675-2015.
24. Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Kostsov V.S., Ionov D.V., Kalinnikov V.V., Makarova M.V., Poborovsky 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, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, Vol. 10, pp. 4521–4536, DOI: 10.5194/amt-10-4521-2017.
25. Xu G., *GPS. Theory, algorithms and applications*, Berlin: Springer, 2007, 340 p., DOI: 10.1007/978-3-540-72715-6.
 26. Xu Y., Jiang N., Xu G., Yang Y., Schuh H., Influence of meteorological data and horizontal gradient of tropospheric model on precise point positioning, *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 56, pp. 2374–2383.
 27. Zhou F., Li X., Li W., Chen W., Dong D., Wickert J., Schuh H., The Impact of Estimating High-Resolution Tropospheric Gradients on Multi-GNSS Precise Positioning, *Sensors*, 2017, Vol. 17, pp. 756–768, DOI: 10.3390/s17040756.