

УДК [528.48:622]+551.510.52

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-40-50

Разработка предложений по формированию поправок за тропосферу на дифференциальных геодезических станциях в горной местности

Х. З. Наджибулла^{1,2}

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Кабульский политехнический университет, г. Кабул, Афганистан

e-mail: najib2015kpu@gmail.com

Аннотация. Тропосфера оказывает существенное влияние на ГНСС-измерения, вызывая задержку радиосигналов от спутников, особенно в горной местности, где поправки за тропосферу на базовой станции и ровере могут отличаться на несколько дециметров. В статье представлены результаты экспериментов по оценке значений тропосферных задержек сигналов ГНСС на базовых станциях EFT CORS в Северо-Кавказском федеральном округе. На основе полученных результатов разработаны рекомендации для формирования дифференциальных поправок в реальном времени в режимах RTK или NetWork RTK в горной местности. Для каждой дифференциальной геодезической станции предлагается исключать из дифференциальной поправки в псевдодальность тропосферные поправки в ГНСС-измерения, вычисленные по модели тропосферы. Для ровера предлагается моделировать поправку за тропосферу по координатам, определенным абсолютным методом, и прибавлять к дифференциальным поправкам в псевдодальность. Таким образом, с помощью модели тропосферы компенсируется разница тропосферных задержек на станциях, расположенных на разных высотах. Сформулированные рекомендации могут использоваться при проектировании и запуске работы дифференциальных геодезических станций в горной местности, в том числе, в Афганистане.

Ключевые слова: постоянно действующие базовые станции (CORS), зенитная тропосферная задержка, режим RTK, горная местность, модель тропосферы, метод точного точечного позиционирования PPP

Для цитирования:

Наджибулла Х. З. Разработка предложений по формированию поправок за тропосферу на дифференциальных геодезических станциях в горной местности // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 40–50. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-40-50

Введение

Тропосфера является значимым фактором, влияющим на ГНСС-измерения, и вызывающим задержку радиосигналов от спутников, в зените около 2 м, а у горизонта – до 20–30 м [1]. Величина тропосферной задержки зависит в основном от атмосферного давления, а также от влажности воздуха. В дифференциальном методе ГНСС при работе в режиме RTK на базовых станциях формируются дифференциальные поправки

в измеренные псевдодальности, включающие, в том числе, поправки за тропосферу. На равнинной и всхолмленной местности при рекомендуемом удалении от базовой станции поправки за тропосферу в измеренные псевдодальности на ровере практически не отличаются от сформированных на базовой станции. В горной местности в связи с большими перепадами высот и атмосферного давления, а также с резкими сменами метеоусловий, поправки за тропосферу на базовой станции и ровере могут значительно отличаться. В этом

случае необходимо или сокращать расстояние между базовыми станциями в горной местности, или вносить коррективы в дифференциальные поправки [2, 3].

В статье [2] было показано, что графики изменения зенитной тропосферной задержки на ГНСС-станциях в горной местности, расположенных на расстоянии по прямой около 40 км, могут отличаться в среднем на 40 см из-за разной высоты расположения станций, а также в течение суток не быть параллельными, из-за изменений метеоусловий. Это, в свою очередь, снижает точность координатных определений на ровере.

Для повышения точности метода RTK в горной местности необходим особенный подход к проектированию сети дифференциальных станций, к формированию дифференциальных поправок RTK от единичных базовых станций, а также к получению сетевого решения NetWork RTK [4–6].

Цель настоящего исследования состоит в разработке предложений по формированию дифференциальных поправок за тропосферу на дифференциальных геодезических станциях в горной местности. Решение задачи основывается на выполнении экспериментов по оценке значений тропосферных задержек сигналов ГНСС на базовых станциях EFT CORS [7] в Северо-Кавказском федеральном округе.

Полученные результаты будут полезны при проектировании сетей дифференциальных геодезических станций и формировании RTK-поправок в горной местности, в том числе в Республике Афганистан.

Методы и модели для вычисления тропосферных задержек радиосигналов спутников ГНСС

Тропосферная задержка радиосигналов спутников ГНСС возникает из-за рефракции радиоволн в нейтральной атмосфере. Величина тропосферной задержки радиосигналов ГНСС не зависит от частоты, она одинакова как для кодовых, так и для фазовых измерений. Тропосферную задержку TD (Tropospheric Delay) представляют в виде двух составляющих – гидростатической (или сухой)

HD , зависящей только от атмосферного давления, и влажной WD , зависящей от температуры и, главным образом, от влажности [1]:

$$\begin{aligned} TD &= m_h ZHD + m_w ZWD; \\ ZTD &= ZHD + ZWD, \end{aligned} \quad (1)$$

где ZTD – полная тропосферная задержка в направлении зенита;

ZHD – гидростатическая составляющая в направлении зенита;

ZWD – влажная зенитная составляющая;

m_h, m_w – гидростатическая и влажная функции отображения для перехода от зенитного направления к направлению на спутник.

Значение гидростатической составляющей в направлении зенита ZHD составляет на уровне моря около 2 м и уменьшается с высотой. Величина влажной зенитной составляющей ZWD может колебаться примерно от нескольких сантиметров до 40 см [1] и определяется изменчивыми водяными парами и температурой в тропосфере над приемником.

Вблизи горизонта полная тропосферная задержка TD достигает величины 20–30 м. В простейшем случае функции отображения m_h, m_w приближенно равняются косекансу высоты направления на спутник h [1]

$$m_h = m_w = \operatorname{cosec} h.$$

Более детальное вычисление функции отображения производится с применением различных вариантов функций отображения, наиболее распространенной из которых является Vienna Mapping Function 1 (VMF1), разработанная и поддерживаемая техническим университетом Вены [8]. В этой модели применяются свои собственные функции отображения и генерируется сетка ($2,0^\circ$ по широте на $2,5^\circ$ по долготе) значений ZHD и ZWD с использованием профилей вертикального давления, температуры и влажности, предоставленных Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). ECMWF берет данные от атмосферных метеостанций со всего мира, местоположения которых мож-

но увидеть на веб-сайте Всемирной метеорологической организации (ВМО) [9].

Тропосферную задержку можно вычислить по значениям температуры, давления и влажности как входным данным для одной из многих моделей атмосферной рефракции. Они обычно носят названия по фамилиям разработавших их ученых: Хопфилд, Саастомойнена и др. [1].

При ГНСС-измерениях метеорологические параметры не всегда измеряются, и поэтому используются простейшие модели тропосферной задержки, основанные на некоторой стандартной атмосфере. Например, гидростатическая зенитная тропосферная задержка ZHD может быть вычислена по модели Саастомойнена [1]:

$$ZHD = \frac{[0,0022768 \pm 0,0000005] \cdot p}{1 - 0,00266 \cdot \cos 2B - 0,00028 \cdot H}, \quad (2)$$

где p – атмосферное давление в миллибарах у антенны приемника; B – геодезическая широта; H – высота над геоидом в километрах.

Давление p при отсутствии метеоданных можно найти по модели стандартной атмосферы [1]:

$$p = 1013,25 \cdot (1 - 0,0226 \cdot H)^{5,226}. \quad (3)$$

Модели тропосферной задержки могут учитывать примерно до 90 % задержки, соответствующей преимущественно гидростатическому компоненту. Остальные 10 % (в основном из-за влажного компонента) серьезно влияют на точность определения координат.

Ряд современных исследований направлен на повышение точности стандартных моделей тропосферы, например, в статье [10] предлагаются два метода для уточнения моделей ZTD Хопфилд и Саастомойнена. Первый основан на добавлении годовых и полугодовых периодических значений для территории Китая, второй – на применении искусственной нейронной сети с обратным распространением ошибок, с использованием данных многолетних измерений, собранных на 67 опорных станциях ГНСС в Китае и прилегающих регионах. Усовершенствованные мо-

дели могут эффективно повысить точность по сравнению с базовыми, снизив погрешность в 1,5–2 раза.

Уточнение региональной тропосферной модели Саастомойнена на территории Китая с применением искусственного интеллекта рассмотрено в [11]. Подобные решения, повышающие точность координатных определений ГНСС за счет уменьшения ошибок, вызванных тропосферными задержками, рассмотрены в [12–14].

Возможность точного определения тропосферной задержки в направлении на спутник обусловило применение ГНСС в изучении атмосферы посредством ее «томографии» радиосигналами от спутников [15–17]. Активно развивается направление ГНСС-метеорологии. В [18,19] рассмотрены перспективы ГНСС-метеорологии на территории России.

Тропосферная задержка в значительной степени компенсируется в относительном методе ГНСС. В дифференциальном методе ГНСС при работе в режиме RTK тропосферные поправки моделируются по результатам наблюдений на базовых станциях и передаются пользователям в составе корректирующей информации. При этом предполагается, что атмосферные условия должны быть близкими на базовой станции и ровере. Из-за изменения этих условий точность определения координат в режиме RTK снижается с увеличением расстояния от базовой станции. В сетевом методе Network RTK дифференциальные поправки интерполируются от сети базовых станций, при этом в области покрытия сетью базовых станций изменение состояния атмосферы на базовых станциях и ровере оказывает меньшее влияние на точность RTK. В горной местности из-за перепадов высот и изменения атмосферных условий даже в сетевой метод RTK может давать неудовлетворительные результаты определения координат.

Тропосферная задержка может также включаться в состав определяемых параметров. Для оценки ZTD и ее компонентов (градиентов) на станциях ГНСС по всему миру используется метод точного точечного позиционирования PPP (Precise Point Positioning) [20].

Международная служба ГНСС (IGS) публикует дискретные значения ZTD и градиентов для своих станций по всему миру [21]. В методе PPP параметры тропосферной задержки включаются как неизвестные в уравнения измеренной фазовой Φ_A^S и кодовой P_A^S псевдодальностей [3, 20]

$$\begin{aligned} -\rho^0 \cdot \Delta \mathbf{R} + m_w \cdot ZWD_A + m_g \cdot [G_N \cos A + G_E \sin A] + c \cdot \delta t_A &= P_A^S - \rho_0 + \sum d; \\ -\rho^0 \cdot \Delta \mathbf{R} + m_w \cdot ZWD_A + m_g \cdot [G_N \cos A + G_E \sin A] + c \cdot \delta t_A + B_A^S &= \Phi_A^S - \rho_0 + \sum \delta, \end{aligned} \quad (4)$$

где ρ^0 – орт вектора станция-спутник, вычисляемый по приближенным координатам станции; $\Delta \mathbf{R}$ – вектор оцениваемых поправок в приближенные координаты станции; m_w, m_g – функции отображения влажной составляющей тропосферной задержки и ее градиентов, соответственно; ZWD_A – оцениваемая влажная составляющая тропосферной задержки в направлении зенита; G_N, G_E – оцениваемые тропосферные градиенты тропосферной задержки; A – азимут направления станция-спутник; δt_A – оцениваемая поправка часов приемника на станции; c – скорость света; B_A^S – оцениваемая псевдонеоднозначность (сумма целочисленной неоднозначности, задержек в аппаратуре и начальных фаз генераторов частоты, выраженная в единицах расстояния); P_A^S, Φ_A^S – ионосферно-свободные кодовая и фазовая псевдодальности; ρ_0 – геометрическая дальность, вычисленная с приближенными координатами станции; d, δ – суммарные моделируемые поправки для кодовых и фазовых псевдодальностей, соответственно.

Здесь гидростатическая составляющая тропосферной задержки ZHD_A входит в число моделируемых поправок кодовых и фазовых измерений (в правой части). Результаты оценивания зенитной тропосферной задержки в горных районах методом PPP представлены в статье [3].

При проведении экспериментов в настоящем исследовании для оценки тропосферных задержек на станциях ГНСС использовался онлайн-сервис обработки ГНСС-измерений методом точного точечного по-

зиционирования CSRS-PPP (Канада). Этот сервис предоставляет данные о гидростатической и влажной зенитной тропосферной задержках, а также градиенты тропосферной задержки на север и на восток, со средними квадратическими погрешностями на уровне 1 см при обработке суточного сеанса ГНСС-измерений [22]. В статье [23] приведены результаты оценки зенитной тропосферной задержки на станциях IGS с помощью нескольких онлайн-сервисов обработки ГНСС-измерений. Здесь показано, что онлайн-сервисы CSRS-PPP, MagicGNSS позволяют получить оценку зенитной тропосферной задержки с сантиметровой точностью. Онлайн-сервисы CSRS-PPP, MagicGNSS используют модель GPT2w [24], в основе которой – модель Саастамойнена для ZHD , Аскне и Норидуса для ZWD погодной карте ERA-Interim. В качестве функций отображения используется Vienna Mapping Function 1 (VMF1), [8]. Сервис CRS-PPP был выбран для обработки ГНСС-измерений благодаря такому подходу к моделированию тропосферных задержек.

Выполнение экспериментальных исследований

В ходе исследований выполнены расчеты зенитных тропосферных задержек радиосигналов ГНСС на дифференциальных геодезических станциях EFT CORS в Северо-Кавказском округе, на дату 09.09.2023. Выбор даты был обусловлен метеоусловиями – на некоторых территориях региона в этот день шли проливные дожди. Карта расположения станций приведена на рис. 1.

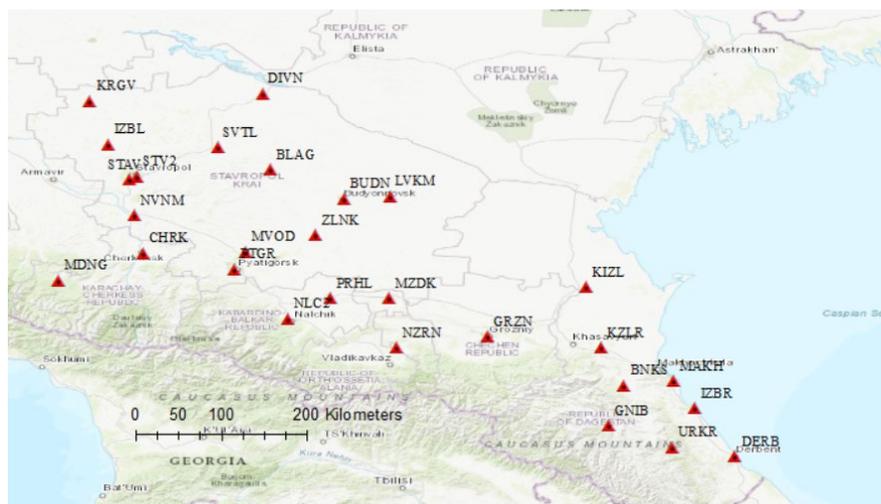


Рис. 1. Карта расположения станций EFT CORS в Северокавказском федеральном округе [2]

Станции EFT CORS расположены на высотах от -7,474 м (KIZL, Кизляр) до 1 265,701 м (URKR, Уркарах), разность высот станций Дербент (DERB) и Уркарах составляет 1 264.5 м при расстоянии между ними по прямой всего 40 км.

Целью экспериментов является демонстрация разностей ZTD на дифференциальных геодезических станциях, расположенных в горной местности.

Зенитные тропосферные задержки $ZTD_{CSRS-PPP}$ на станциях EFT CORS вычислялись из постобработки ГНСС-измерений методом точ-

ного точечного позиционирования PPP с помощью онлайн-сервиса CSRS-PPP [22].

На станциях были также вычислены по модели Саастомойнена (2) зенитные тропосферные задержки $ZHD_{Saastomoinen}$ (гидростатическая составляющая), зависящие только от высоты и географической широты станций и являющиеся постоянными для каждой станции.

На рис. 2 изображена картосхема полных зенитных тропосферных задержек ZTD на станциях EFT CORS, оцененных с помощью онлайн-сервиса CSRS-PPP.

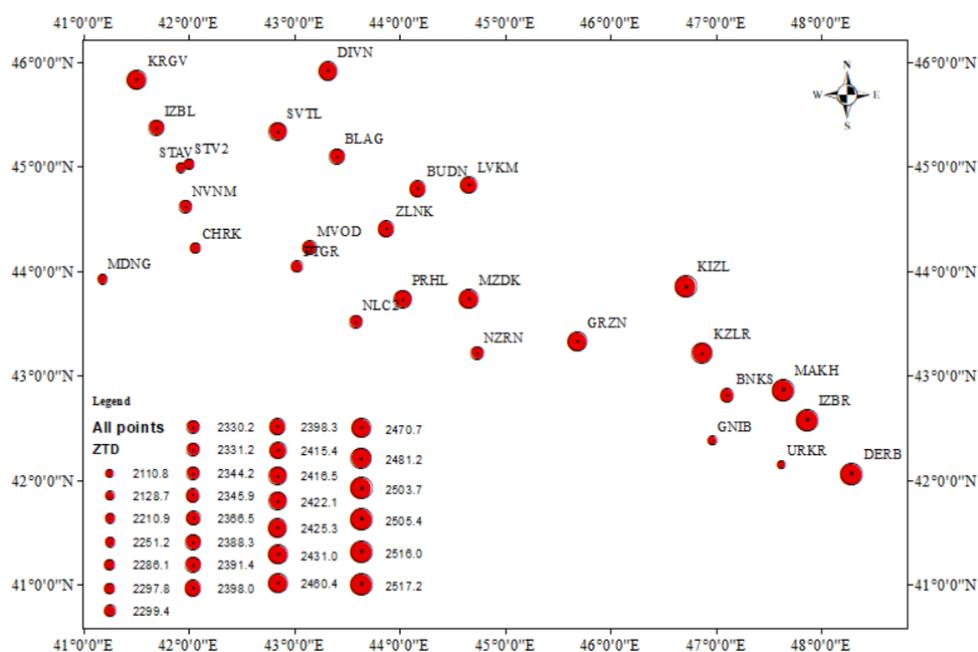


Рис. 2. Полные зенитные тропосферные задержки ZTD на станциях EFT CORS, в мм

На рис. 3 представлена картосхема разностей тропосферных задержек $ZTD_{CSRS-PPP}$ и $ZHD_{Saastomoinen}$.

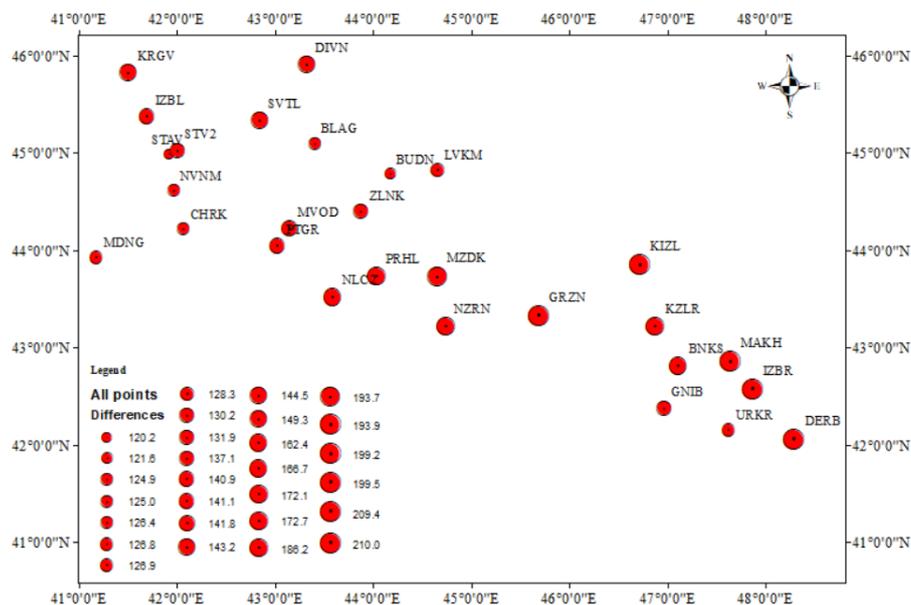


Рис. 3. Разности тропосферных задержек $ZTD_{CSRS-PPP}$ и $ZHD_{Saastomoinen}$, мм

По результатам вычислений зенитной тропосферной задержки на станциях EFT CORS в Северо-Кавказском федеральном округе можно отметить следующее:

- разность между максимальным и минимальным значением полной зенитной тропосферной задержки, определенной с помощью CSRS-PPP, составляет величину 406,4 мм, это разность ZTD на двух соседних станциях CORS Дербент и Уркараух. Эта величина критична для высокоточных ГНСС-измерений в режиме RTK как при работе от отдельных базовых станций, так и для сетевого метода ГНСС;

- разность между максимальным и минимальным значением зенитной тропосферной задержки, определенной с помощью модели Саастомойнена (гидростатическая компонента), составляет величину 325,8 мм. Разность модельных значений ZHD около 30 см вызвана главным образом разностью высот станций, поскольку изменение географических широт в рассматриваемом районе небольшое. Для горных районов Афганистана с большими перепадами высот эта разность будет еще выше;

- для рассматриваемых пунктов разброс разностей ZHD , вычисленных по модели Саастомойнена и предоставленных онлайн-сервисом CSRS-PPP, составил величину 15,3 мм. Эта величина косвенно характеризует точность модели Саастомойнена, где для вычисления ZHD необходим минимум данных – только высота и географическая широта точки наблюдения, в то время как алгоритмы моделирования тропосферы в CSRS-PPP более сложные [23];

- и, наконец, среднее значение разности между полной зенитной тропосферной задержкой ZTD , оцененной с помощью CSRS-PPP, и вычисленной по модели Саастомойнена, составляет величину 149,3 мм. Разница этих значений на соседних станциях Дербент и Уркараух – 82,5 мм, что почти в пять раз меньше разницы непосредственно вычисленных зенитных тропосферных задержек на станциях.

Заключение

Исходя из полученных результатов вычислений, можно дать следующие рекомендации при формировании дифференциальных попра-

вок в измерения в реальном времени, в режимах RTK или NetWork RTK в горной местности.

Для каждой дифференциальной геодезической станции вычисляется тропосферная поправка в ГНСС-измерения, зависящая от широты высоты этой станции, для чего предлагается простой и надежный вариант модели тропосферы Саастомойнена, с учетом функции отображения, зависящей от высоты спутников над горизонтом. Эта поправка исключается из формируемой на базовой станции дифференциальной поправки в псевдодальность.

Для ровера, в свою очередь, поправка за тропосферу вычисляется по широте и высоте, определенным абсолютным методом, и прибавляется в дифференциальные поправки в псевдодальность. Таким образом, с помощью модели тропосферы Саастомойнена компенсируется разница ZTD на базовых станциях, расположенных на разных высотах.

При формировании дифференциальных поправок ZTD могут вычисляться по формуле (2), где на базовых станциях необходимо иметь датчики атмосферного давления (в этом случае значение ZTD будет несколько меняться в зависимости от изменения давления), либо может использоваться упрощенная формула, где атмосферное давление вычисляется по формуле (3), и тогда значение ZTD будет постоянно для каждой станции.

В перспективе можно использовать более точные и детальные модели тропосферы, с картами погоды, улучшенными моделями тропосферы на заданной территории (например, [10,11]), но принцип учета тропосферы в ГНСС-измерениях в горной местности остается тем же.

При сетевом решении Network RTK формируется поле дифференциальных поправок с вычетом тропосферных задержек, а на ровере моделируется индивидуальная тропосферная задержка.

При таком подходе к формированию дифференциальных поправок RTK в горной местности нет необходимости располагать дифференциальные геодезические станции ближе к друг другу, чтобы уменьшить различие атмосферных условий на базовой станции и ровере, вызванное различной высотой их расположения.

Сформулированные рекомендации могут использоваться при проектировании и запуске работы дифференциальных геодезических станций в горной местности, в том числе, в Афганистане.

Автор благодарит компанию EFT GROUP за предоставление свободного доступа к RINEX-файлам ГНСС-измерений на станциях EFT CORS Северокавказского федерального округа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К. М. Тропосферная задержка при ГНСС измерениях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 6–11.
2. Наджибулла Х. З., Гиенко Е. Г. Исследование качества ГНСС-измерений на дифференциальных станциях в горной местности // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов VII Национальной научно-практической конференции. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. – Т. 2. – С. 223–230.
3. Gratton P., et al. Kinematic zenith tropospheric delay estimation with GNSS PPP in mountainous areas. // Sensors 2021. – № 17 (21) – С. 5709. – DOI 10.3390/s21175709.
4. Наджибулла Х. З., Гиенко Е. Г. Основные направления развития государственной координатной основы в Афганистане // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 49–58. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-49-58.
5. Наджибулла Х. З., Обиденко В. И. Создание и развитие дифференциальных геодезических станций в горной местности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. № 1– С. 113–123. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-113-123.

6. Кавешников М. Б., Старостин А. Ю., Трифанова Е. К. Сети постоянно действующих дифференциальных геодезических станций как часть общей информационной системы для малонаселенных территорий, создаваемой с целью уменьшения хозяйственных издержек и рисков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 2 – С. 156–162. – DOI : 10.33764/2618-981X-2020-1-2-156-162.
7. EFT CORS, Сеть базовых станций CORS [Электронный ресурс]. – URL: <https://bp.eft-cors.ru/basestations>.
8. Boehm J., Werl B., Schuh N. Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2006, – 111. – B02406.
9. Всемирная метеорологическая организация [Электронный ресурс]. – URL: <https://oscar.wmo.int/surface/index.html>.
10. Yang F., Meng X., Guo J. et al. Development and evaluation of the refined zenith tropospheric delay (ZTD) models// *Satellite Navigation – 2021* – Vol. 2, 21 – P. 1–9. – DOI 10.1186/s43020-021-00052-0.
11. Kong J., Yao Y., Shi J., Li X. Regional Tropospheric Correction Model from GNSS–Saastamoinen–GPT2w Data for Zhejiang Province// *Atmosphere* 14.5. – 2023 – 815. – DOI 10.3390/atmos14050815.
12. Chen P., Ma Y., Liu H., Zheng N. A new global tropospheric delay model considering the spatiotemporal variation characteristics of ZTD with altitude coefficient [Electronic resource] // *Earth and Space Science*, 7, e2019EA000888. – URL: <https://doi.org/10.1029/2019EA000888>.
13. Xu C., Zhu Y., Xu X., Lu C., Li X., Li Z., Heinkelmann R. et al. GNSS tropospheric gradients with high temporal resolution and their effect on precise positioning // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2016 – 121(2) – P. 912–930. – DOI 10.1002/2015JD024255.
14. Ma H., Psychas D., Xing X. et al. Influence of the inhomogeneous troposphere on GNSS positioning and integer ambiguity resolution // *Advances in Space Research* – 2021. – 67.6. – P. 1914–1928. – DOI 10.1016/j.asr.2020.12.043.
15. Nzelibe I. U., Herbert T., Idowu T.O. Assessment of GNSS zenith tropospheric delay responses to atmospheric variables derived from ERA5 data over Nigeria // *Satellite Navigation – 2023*. – 4.1 – P. 1–16. DOI 10.1186/s43020-023-00104-7.
16. Rohm W., Bosy J. The verification of GNSS tropospheric tomography model in a mountainous area// *Advances in Space Research* – 2011. – 47.10. – P. 1721–1730. DOI 10.1016/j.asr.2010.04.017.
17. Trzcina E., Rohm., and Smolak K. Parameterization of the GNSS troposphere tomography domain with optimization of the nodes' distribution// *Journal of Geodesy*. – 2023. – 97.1. – P. 2. – DOI 10.1007/s00190-022-01691-0.
18. Karpik A. P., Gienko E. G., Ganagina I. G., Goldobin D. N. Network of continuously operating reference stations in Novosibirsk region: analysis of zenith tropospheric delay estimate [Electronic resource] // *Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering)*. – 2019. – URL: <http://spiedl.org/>.
19. Хунай-Оол Ч. В., Гиенко Е. Г. ГНСС-метеорология: возможности и перспективы развития в России и за рубежом// Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 6 : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – Т.25, № 2 – С.128–134. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-6-2-128-143.
20. Липатников Л. А. О методике точного дифференциального позиционирования (Precise Point Positioning) и перспективах её совершенствования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 48–53.

21. IGS. Tropospheric Products – Продукты тропосферы IGS – URL: <https://igs.org/products/#troposphere>.

22. CSRS-PPP, Canadian Geodetic Survey [Электронный ресурс] // Natural Resources Canada – URL: <https://webapp.csrscs-nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.

23. Валайтите А. А. Анализ точности оценки зенитных тропосферных задержек, полученных с помощью метода высокоточного абсолютного местоопределения // Труды МАИ. – 2020. – №. 110. – С. 7 – DOI 10.34759/trd-2020-110-15.

24. Bohm J. et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere // GPS Solution – 2015 – Vol. 19 – P. 433 – 441.

Об авторах

Хасан Зумортай Наджибулла – аспирант СГУГиТ, преподаватель кафедры инженерной геодезии Кабульского политехнического университета.

Получено 29.02.2024

© Х. З. Наджибулла, 2024

Development of proposals for the formation of corrections for the troposphere at differential geodetic stations in mountainous areas

H. Z. Najibullah^{1,2}

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Kabul Polytechnic University, Kabul, Afghanistan

e-mail: najib2015kpu@gmail.com

Abstract. The troposphere has a significant impact on GNSS measurements, causing delays in radio signals from satellites, especially in mountainous areas where troposphere corrections at the base station and rover can differ by several decimeters. The article presents the results of experiments to estimate the values of tropospheric delays of GNSS signals at EFTCORS base stations in the North Caucasus Federal District. Based on the results obtained, recommendations have been developed for the generation of differential corrections in real time in RTK or NetWorkRTK modes in mountainous areas. For each differential geodetic station, it is proposed to exclude tropospheric corrections in GNSS measurements calculated from the troposphere model from the differential pseudorange correction. For the rover, it is proposed to model the troposphere correction using coordinates determined by the absolute method and add it to the differential pseudorange corrections. Thus, using the troposphere model, the difference in tropospheric delays at stations located at different altitudes is compensated. The formulated recommendations can be used in the design and launch of differential geodetic stations in mountainous areas, including Afghanistan.

Keywords: constantly operating reference stations (CORS), zenith tropospheric delay, RTK mode, mountainous terrain, troposphere model, precision point positioning method PPP

REFERENCES

1. Antonovich, K. M. (2012). Tropospheric delay in GNSS-measurements. *Izv.vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [News of universities. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 2/1, 6–11 [in Russian].

2. Nadzhibullah, X.Z., & Gienko, E.G. (2024) Study of the quality of GNSS measurements at differential stations in mountainous areas. In *Sbornik materialov VII Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii Regulirovaniye zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoye obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resh-*

eniya: T.2 [Proceedings of the 7th National Scientific and Practical Conference: Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions: Vol.2],pp.223–230. Novosibirsk: SSUGT Publ. DOI 10.33764/2687-041X-2024-2-216-223 [in Russian].

3. Gratton, P., & et al. (2021). Kinematic zenith tropospheric delay estimation with GNSS PPP in mountainous areas. *Sensors*, 17 (21), 5709. DOI 10.3390/s21175709.

4. Nadzhibullah, X.Z., & Gienko, E.G. (2023) The basic development directions of Afghanistan state coordinate framework. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(28), 49–58 DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-49-58 [in Russian].

5. Nadzhibullah, X.Z., & Obidenko, V. I. (2022). Development of continuously operating reference stations in mountainous areas. *Interexpo GEO-Sibir'. XVIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, 18–20 maya 2022 g., Novosibirsk : sbornik materialov T. 1: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya» [Interexpo GEO-Siberia. XVIII International Scientific Congress, May 18–20, 2022, Novosibirsk: collection of materials in 8 volumes. Vol. 1: International scientific conference “Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying”]* (pp.113–123). Novosibirsk: SSUGT Publ. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-113-123 [in Russian].

6. Kaveshnikov, M. B., Starostin, A. Yu., & Trifanova, E. K. (2020) Network of permanently operating differential geodesic stations as a part of general information system for all-populated territories created to household risks and expenses In *Interexpo GEO-Sibir'. XVIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, 18 iyunya -8 iyulya 2022 g., Novosibirsk : sbornik materialov v 8 t. T. 1: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya».* [Interexpo GEO-Siberia. XVIII International Scientific Congress, June 18 - 8 July 2022, Novosibirsk: collection of materials in 8 volumes. Vol. 1: International scientific conference “Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying.”] (pp.156–162). Novosibirsk: SSUGT Publ. DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-2-156-162 [in Russian].

7. EFT CORS. Retrieved from <https://bp.eft-cors.ru/basestations>.

8. Boehm, J., Werl, B. & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 111, B02406.

9. World Meteorological Organization. Retrieved from <https://oscar.wmo.int/surface/index.html>.

10. Yang, F., Meng, X., Guo, J. & et al. (2021). Development and evaluation of the refined zenith tropospheric delay (ZTD) models. *Satellite Navigation* 2, 21, 1–9. DOI 10.1186/s43020-021-00052-0.

11. Kong, J., Yao, Y., Shi, J., & Li, X. (2023). Regional Tropospheric Correction Model from GNSS–Saastamoinen–GPT2w Data for Zhejiang Province. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 14(5), 815, DOI 10.3390/atmos14050815.

12. Chen, P., Ma, Y., Liu, H. & Zheng, N. (2019). A new global tropospheric delay model considering the spatiotemporal variation characteristics of ZTD with altitude coefficient. *Earth and Space Science*, 7, e2019EA000888. DOI 10.1029/2019EA000888.

13. Xu, C.; Zhu, Y.; Xu, X.; Lu, C., Li, X., Li, Z., Heinkelmann, R. & at al. (2016). GNSS tropospheric gradients with high temporal resolution and their effect on precise positioning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(2), 912–930. DOI 10.1002/2015JD024255.

14. Ma, H., Psychas, D., Xing, X. et al. Influence of the inhomogeneous troposphere on GNSS positioning and integer ambiguity resolution (2021). *Advances in Space Research*. 67.6, 1914–1928. DOI 10.1016/j.asr.2020.12.043.

15. Nzelibe, I. U., Herbert, T. & Idowu T. O. (2023). Assessment of GNSS zenith tropospheric delay responses to atmospheric variables derived from ERA5 data over Nigeria. *Satellite Navigation* 4.1, 1–16. DOI 10.1186/s43020-023-00104-7.

16. Rohm, W., Bosy, J. (2011). The verification of GNSS tropospheric tomography model in a mountainous area. *Advances in Space Research* 47.10, 1721–1730. DOI 10.1016/j.asr.2010.04.017.

17. Trzcina, E., Rohm, W. & Smolak, K. (2023). Parameterization of the GNSS troposphere tomography domain with optimization of the nodes' distribution. *Journal of Geodesy* 97.1, 2. DOI 10.1007/s00190-022-01691-0.
18. Karpik, A.P., Gienko, E.G., Ganagina, I.G. & Goldobin, D.N. (2019). Network of continuously operating reference stations in Novosibirsk region: analysis of zenith tropospheric delay estimate. *Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering)*. Retrieved from <http://spiedl.org/>.
19. Khunay-Ool, Ch.V., Gienko, E.G. (2020). GNSS-meteorology: opportunities and prospects for development in russia and abroad. In *Interexpo GEO-Sibir'. XVI Mezhdunarodnyy nauchnyy kongress, 18 iyunya – 8 iyulya 2020 g., Novosibirsk : sb. materialov v 8 t. T. 6 : Magisterskaya nauchnaya sessiya «Pervyye shagi v nauke». [Interexpo GEO-Siberia. XVI International Scientific Congress, June 18 – July 8, 2020, Novosibirsk: Sat. materials in 8 volumes. T. 6: Master's scientific session "First steps in science."]* (pp.128–134). Novosibirsk: SSUGT Publ. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-6-2-128-134 [in Russian].
20. Lipatnikov, L. A. (2012). On precise point positioning and its future development In *Interexpo GEO-Sibir'-2012. VIII Mezhdunarodnyy nauchnyy kongress : sbornik molodykh uchenykh SSGA №7 (Novosibirsk, 10–20 aprelya 2012 g.). [Interexpo GEO-Siberia-2012. VIII International Scientific Congress: collection of young scientists of the SSGA No 7 (Novosibirsk, April 10–20, 2012)]* (pp. 48–53). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
21. IGS. Tropospheric Products. Retrieved from <https://igs.org/products/#troposphere>.
22. CSRS-PPP, Canadian Geodetic Survey. Natural Resources Canada. Retrieved from <https://webapp.csrscs-nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.
23. Valaitite, A.A. (2020). Analysis of the accuracy of the estimation of zenith tropospheric delays obtained using the method of high-precision absolute location. *Trudy MAI [Electronic journal «Trudy MAI»]*, 110, 17. DOI: 10.34759/trd-2020-110-15 [in Russian].
24. Bohm, J. & et al. (2015). Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere. *GPS Solution*. Vol. 19, pp. 433–441.

Author details

Hasan Zurmotai Najibullah – PhD Student at SSUGT; Lecturer at the Department of Engineering Geodesy, Kabul Polytechnic University (KPU).

Received 29.02.2024

© H. Z. Najibullah, 2024