

Х. З. Наджибулла^{1,2}, Е. Г. Гиенко^{1}*

Исследование качества ГНСС-измерений на дифференциальных станциях в горной местности

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

²Кабульский политехнический университет, г. Кабул, Афганистан
*e-mail: elenagienko@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования заключалась в экспериментальном определении качества ГНСС-измерений на дифференциальных станциях в горной местности, для выявления особенностей их работы, обнаружения возможных проблем с координатными определениями, разработке предложений по организации сетей дифференциальных геодезических станций в горах. В статье представлен анализ результатов обработки ГНСС-измерений на дифференциальных геодезических станциях EFT CORS, расположенных в Северокавказском федеральном округе Российской Федерации. Регион расположения станций имеет сходство с некоторыми провинциями Афганистана по площади и разнообразию горных районов. Отмечается хорошее качество ГНСС-измерений на станциях, что объясняется, главным образом, выбором расположения станций и наличием современного ГНСС-оборудования, а также длительным сеансом ГНСС-измерений. Выполнено сравнение полученных координат и высот с контрольными значениями. Продемонстрировано значительное изменение зенитной тропосферной задержки на соседних станциях и в регионе в целом, что является проблемой формирования сетевого решения NetWorkRTK. Полученный опыт будет полезен при проектировании и запуске работы дифференциальных геодезических станций в Афганистане.

Ключевые слова: ГНСС-измерения в горной местности, дифференциальные геодезические станции, зенитная тропосферная задержка, NetWorkRTK, PPP

H. Z. Najibullah^{1,2}, E. G. Gienko^{1}*

Study of the quality of GNSS measurements at differential stations in mountainous areas

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

²Kabul Polytechnic University, Kabul, Afghanistan
*e-mail: elenagienko@yandex.ru

Abstract. The purpose of the study is to determine the quality of GNSS measurements at continuously reference stations in mountainous areas, to identify the features of their work, to detect possible problems with coordinate definitions, to develop proposals for the organization of CORS in the mountains. The article presents an analysis of processing GNSS measurements results at stations EFT CORS located in the North Caucasus Federal District of the Russian Federation. The region where the stations are located is similar to some provinces of Afghanistan in terms of area and diversity of mountainous areas. The article notes the good quality of GNSS measurements at the stations, which is mainly due to the choice of station location and the availability of modern GNSS equipment, as well as a long session of GNSS measurements. The obtained coordinates and heights are compared with the reference values. A significant change in the zenith tropospheric delay demonstrated at neighboring stations and in the

region as a whole, which is a problem of forming a NetWorkRTK network solution. The experience gained will be useful in the design and launch of differential geodetic stations in Afghanistan.

Keywords: GNSS measurements in mountainous terrain, CORS, Zenith tropospheric delay, Network RTK, PPK

Введение

В настоящее время актуально изучение точности и надежности ГНСС-измерений в горных районах, включая такие регионы, как Афганистан, где сигналы спутников подвержены переотражению и интерференции, вследствие чего возникают систематические ошибки, затрудняющие получение высококачественных измерений [1, 2].

Цель исследования заключалась в экспериментальном определении качества ГНСС-измерений на дифференциальных станциях в горной местности, для выявления особенностей их работы, обнаружения возможных проблем с координатными определениями, выработке предложений по организации станций CORS в горах.

Регионом для исследования был выбран Северокавказский федеральный округ Российской Федерации, площадью 170,4 тыс. км². Разность высот между высшей и низшей точками округа составляет около 5500 м. Территория региона покрыта дифференциальными геодезическими станциями (Continuously Operated Reference Stations, CORS) компании EFT, причем данные о станциях, координаты в WGS-84 и ITRF, и RINEX-файлы ГНСС-измерений находятся в свободном доступе [3].

Выбор Северокавказского округа обусловлен его сходством с некоторыми провинциями Афганистана, включая площадь и разнообразие гористых районов, от низких предгорий до высоких хребтов. Это разнообразие позволяет провести сравнительный анализ качества ГНСС-измерений в различных условиях горного рельефа. Горные районы Афганистана занимают около 80% территории, то есть около 521,8 км², что примерно в три раза больше по площади Северокавказского федерального округа. Разность высот между высшей и низшей точками Афганистана составляет около 7500 м, однако, стоит отметить, что на высоте выше 5000 м люди практически не живут, и здесь нет необходимости развивать сеть дифференциальных геодезических станций. Есть разница между регионами по широте – столица Афганистана Кабул расположена на широте 34,5 градусов, что на 8 градусов южнее средней широты Северокавказского федерального округа.

Результаты исследования могут использоваться при проектировании спутниковых геодезических сетей и выполнении ГНСС-измерений в горах, например, в Афганистане.

Методы и материалы

Исходными данными для выполнения экспериментальных исследований были суточные RINEX-файлы ГНСС измерений на 28 станциях EFT CORS Расположение станций показано на рис.1.

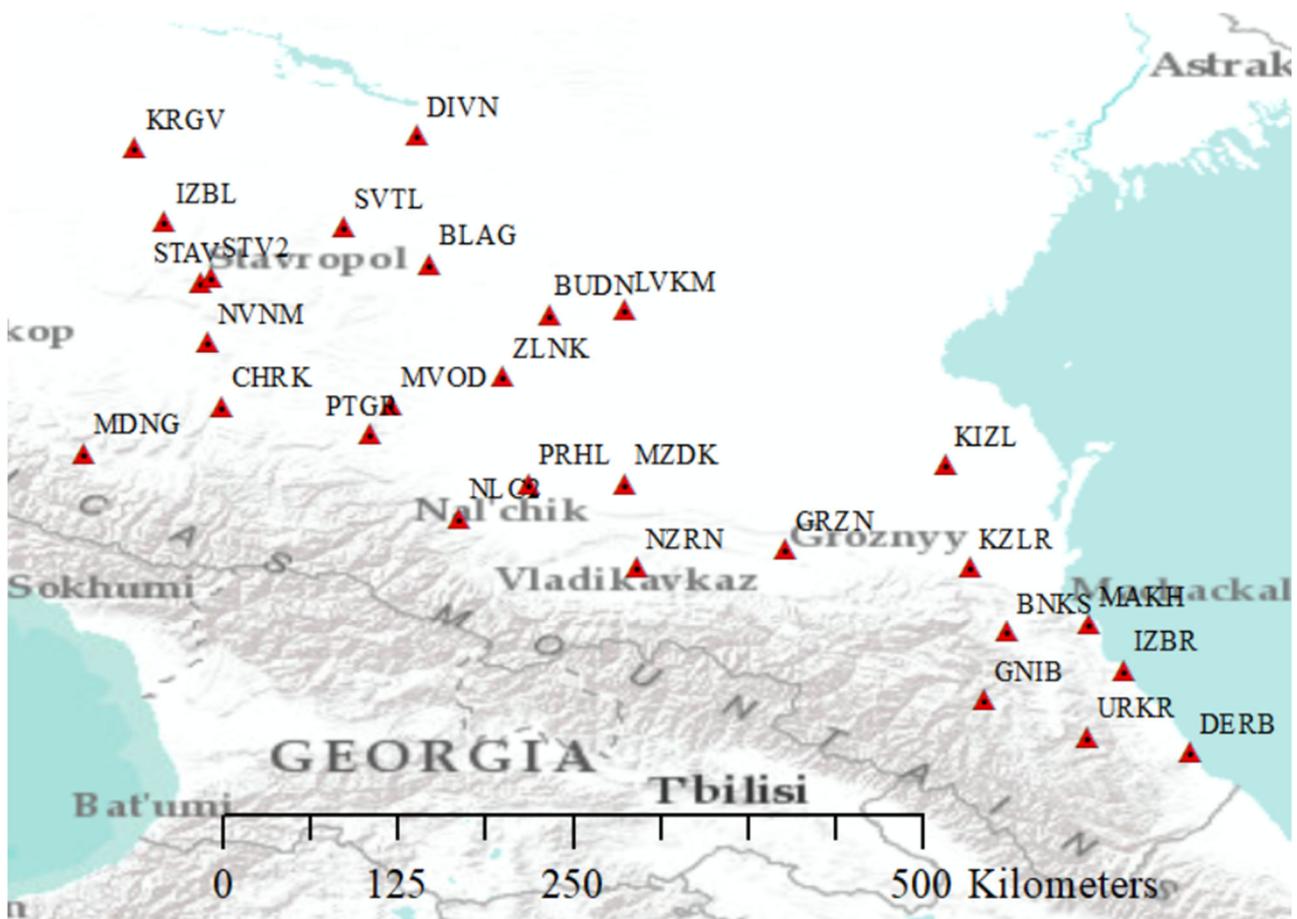


Рис. 1. Карта расположения станций EFT CORS в Северокавказском федеральном округе

Контрольные значения координат станций EFT CORS в системе ITRF2014 на эпоху 2010.0, приведенные на сайте компании, определялись из обработки недельных сеансов ГНСС-наблюдений в программе Trimble RTX.

Кроме того, необходимыми данными были скорости смещения пунктов из-за движения литосферных плит. Значения скоростей были вычислены с помощью онлайн-калькулятора UNAVCO [4] по модели ITRF2014.

Сведения о станциях EFT CORS приведены в табл.1.

Из табл.1. видно, что максимальная разница по высоте расположения станций – 1273 м. Станции расположены в городах и районных центрах.

Оценка качества ГНСС-измерений на постоянно действующих станциях может выполняться разными методами и с привлечением различного программного обеспечения, см., например, [5, 6].

Из методов обработки ГНСС-измерений был выбран метод точного точечного позиционирования (Precise Point Positioning, PPP), поскольку здесь возможна оценка зенитной тропосферной задержки на станциях. Особенностью рассматриваемого метода является вычисление координат определяемых точек в той же системе отсчета и на ту же эпоху, в которой даются эфемериды спутников ГНСС в IGS, а именно на среднюю эпоху наблюдения. Обработка суточных

файлов ГНСС-измерений выполнялась методом PPP с помощью канадского онлайн-сервиса CSRS-PPP [7], в результате была сформирована база отчетов по обработке для всех рассматриваемых станций. Координаты станций из обработки ГНСС-измерений с помощью онлайн-сервиса CSRS-PPP были получены в ITRF2014 на средний момент измерений.

Таблица 1

Сведения о станциях EFT CORS в Северокавказском федеральном округе (фрагмент)

ID	Название	Широта N	Долгота E	Высота, м	Скорости смещения пунктов, мм/год		
					V _X	V _Y	V _Z
URKR	Уркарах	42° 09' 30.3"	47° 37' 53.3"	1265.701	-24.0	13.7	6.8
GNIB	Гуниб	42° 23' 16.5"	46° 57' 50.0"	1212.497	-23.9	13.8	6.9
MDNG	Медногорский	43° 55' 53.6"	41° 10' 50.8"	857.237	-23.2	7.3	19.2
STAV	Ставрополь	44° 59' 53.9"	41° 55' 44.4"	669.990	-22.8	14.4	7.4
NZRN	Назрань	43° 13' 3.8"	44° 44' 10.8"	564.333	-23.4	14.1	7.2
BNKS	Буйнакск	42° 48' 59.1"	47° 07' 06.7"	484.692	-23.9	13.7	6.8
NVNM	Невинномысск	44° 37' 13.5"	41° 58' 31.6"	383.269	-22.8	14.5	7.5
PRHL	Прохладный	43° 44' 25.5"	44° 02' 10.5"	214.421	-23.3	14.2	7.2
MZDK	Моздок	43° 44' 14.2"	44° 39' 22.8"	152.219	-23.4	14.1	7.1
DERB	Дербент	42° 03' 49.0"	48° 17' 25.6"	1.175	-24.2	13.5	6.7
KIZL	Кизляр	43° 51' 31.4"	46° 43' 07.1"	-7.474	-23.9	13.6	6.8

Критериями для анализа результатов являлись:

- разности прямоугольных пространственных координат станций X, Y, Z, и высот H с контрольными значениями, приведенными на сайте EFT CORS, средние квадратические погрешности координат (СКП);
- процент фиксированного решения;
- распределение спутников на небесной сфере;
- время сходимости решения;
- результаты оценки зенитной тропосферной задержки.

Результаты

Для анализа разностей вычисленных координат станций с контрольными значениями необходимо было привести их к одной эпохе, именно к 2010.0,

с учетом скоростей движения станций. Движение именно литосферных плит не вызывает смещения по высоте, поэтому геодезические высоты станций Н, вычисленные и контрольные, сравнивались непосредственно. В табл. 2. приведены разности координат и высот с контрольными значениями ΔX , ΔY , ΔZ , ΔH , СКП из обработки методом PPP, а также проценты фиксированного решения (Fixed Ambiguities).

Таблица 2

Разности координат с контрольными значениями и процент фиксированного решения

ID	%	ΔX мм	СКП X мм	ΔY мм	СКП Y мм	ΔZ мм	СКП Z мм	ΔH мм	СКП H мм
URKR	96,69	-44	± 5	11	± 5	18	± 6	-5	± 9
GNIB	98,70	-47	± 5	18	± 6	17	± 7	-3	± 10
MDNG	99,48	-45	± 5	-81	± 5	188	± 6	10	± 9
STAV	98,37	-33	± 5	5	± 5	13	± 6	-7	± 9
NZRN	96,19	-27	± 5	19	± 6	3	± 7	-3	± 10
BNKS	99,02	-35	± 5	14	± 6	0	± 6	-10	± 9
NVNM	98,75	-35	± 5	19	± 5	25	± 6	8	± 9
PRHL	98,64	-40	± 5	21	± 5	25	± 6	7	± 9
MZDK	99,78	-40	± 5	6	± 5	5	± 6	-15	± 9
DERB	99,27	-44	± 5	-2	± 5	-3	± 6	-25	± 9
KIZL	99,60	-22	± 4	30	± 5	33	± 6	27	± 9

Процент фиксированного решения, приведенный в табл.2. , отображает высокое качество суточных сеансов ГНСС-измерений, которое определяется, в первую очередь, хорошим выбором места расположения станций EFT CORS и наличием современных ГНСС-приемников.

Анализируя разности координат и высот с контрольными значениями, можно заметить систематическое смещение около 4 см по координате X. Координаты станции MDNG имеют грубые смещения, что вызвано физическим изменением положения ГНСС-антенны на станции после определения координат в ITRF2014. Смещения по высоте для большинства станций не превышают СКП, за исключением трех, последних в списке. Значительная разница может по высоте быть вызвана собственно погрешностями ГНСС-измерений и обработки, изменением высоты антенны, а также неучтенными вертикальными смещениями станций, располагаемых в геодинамически активном регионе.

При анализе результатов рассматривалось время сходимости решения методом PPP, и практически для всех станций решение по широте (север-юг) и высоте (вверх) сходилось в течение часа, в то время как по долготе (запад-восток) схо-

димось решения происходила спустя 2-2,5 часа. Возможно, это связано с распределением спутников на небесной сфере на данной географической широте, где в северной части практически нет спутников. Сходимость решения и треки спутников на небесной сфере для пункта URKR показаны на рис.2.

Особенный интерес для анализа ГНСС-измерений на дифференциальных геодезических станциях в горной местности вызывают результаты оценивания зенитной тропосферной задержки на станциях, поскольку ее величина из-за перепада высот, а также из-за смены метеоусловий может изменяться значительно как на отдельных станциях, так и между станциями [1,2, 8].

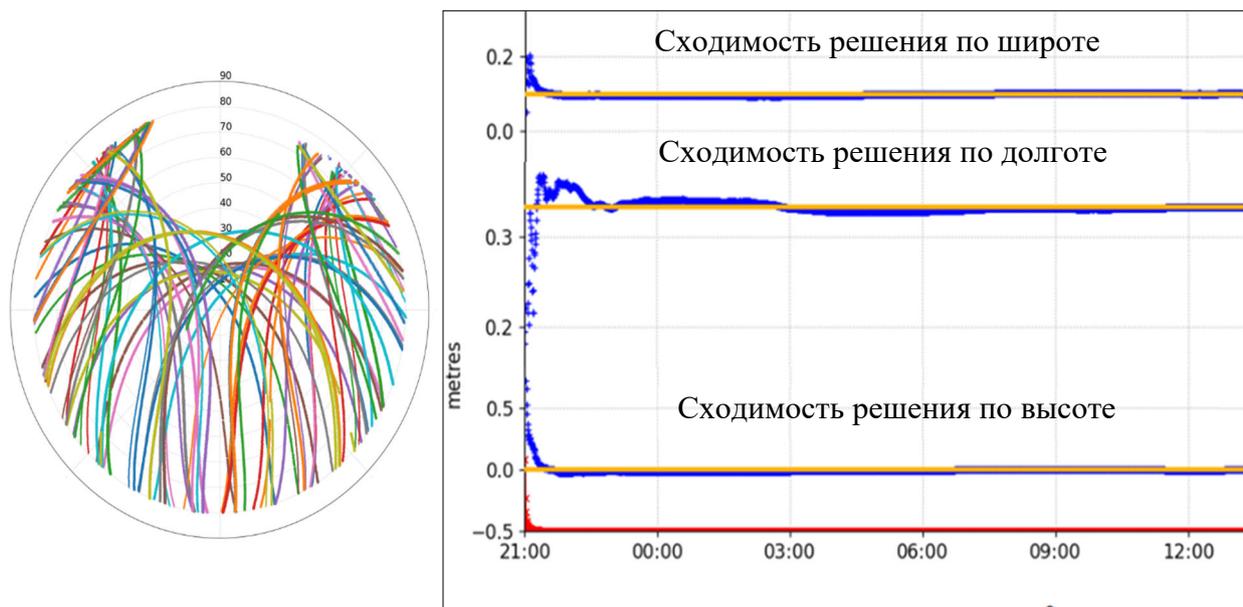


Рис.2. Треки спутников на небесной сфере, сходимость решения методом PPP на станции URKR

По результатам вычисления зенитной тропосферной задержки было выявлено, что графики изменения этой величины за время сеанса ГНСС-измерений на соседних станциях могут отличаться как по среднему значению на более чем 40 см, что связано с разной высотой расположения станций, так и по своему поведению (не параллельны), что связано с различными метеоусловиями на станциях, см. рис.3 – графики зенитной тропосферной задержки на соседних станциях EFT CORS URKR и DERB с расстоянием по прямой около 40 км.

Из-за большого разброса значений зенитной тропосферной задержки на соседних станциях, в горной местности требуется особый подход к проектированию сети дифференциальных станций, к формированию дифференциальных поправок RTK от единичных базовых станций, а также и к получению сетевого решения NetWork RTK, [8]. Возможно, систематическую составляющую тропосферных поправок RTK, зависящую только от высоты базовой станции и ровера,

следует учитывать по тропосферным моделям. Учет тропосферы в ГНСС-измерениях в горной местности – тема отдельного исследования.

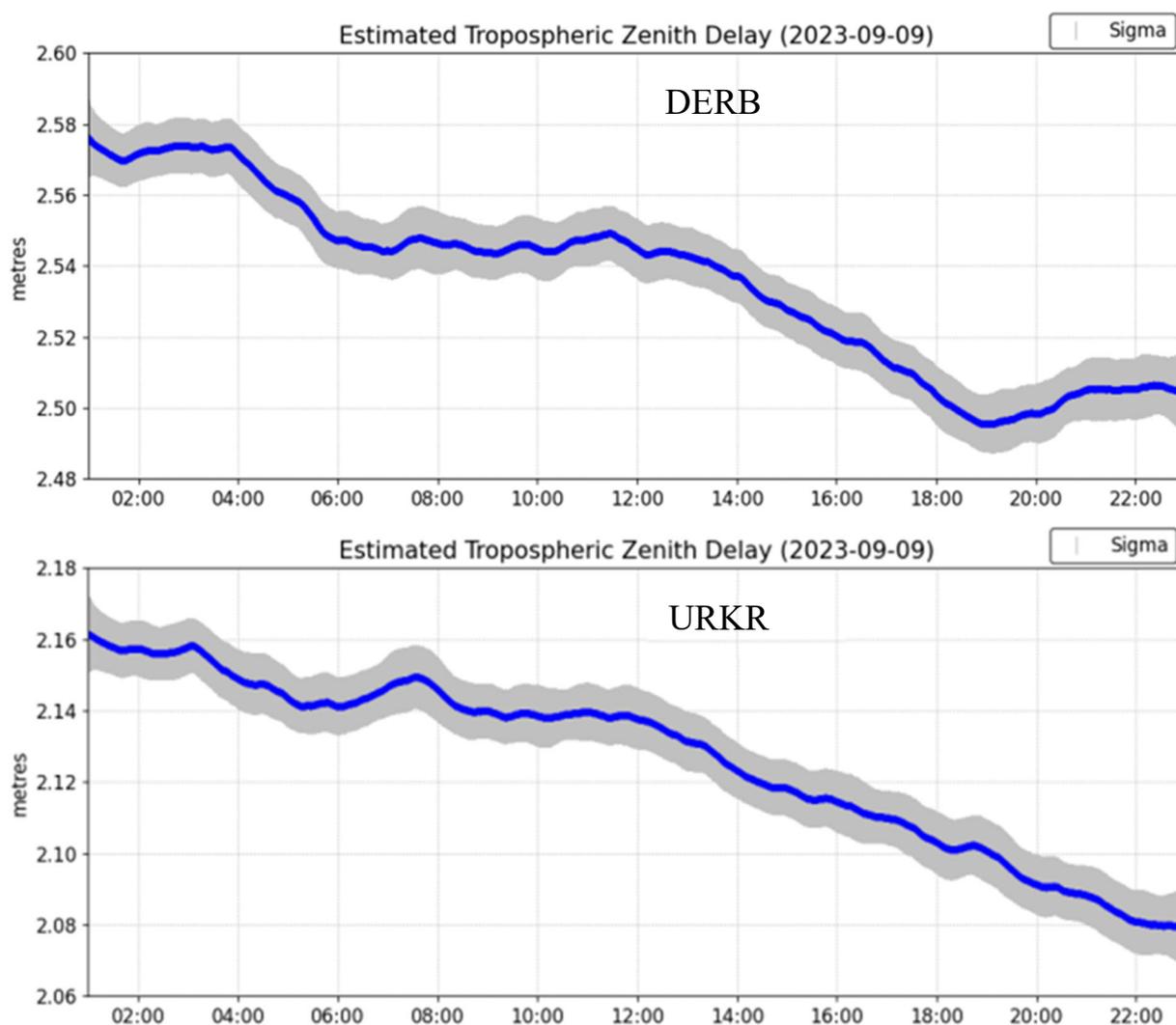


Рис. 3. Графики зенитной тропосферной задержки на станциях EFT CORS

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Расположение в горах не оказало влияния на качество ГНСС-измерений на станциях EFT CORS, что объясняется, главным образом, выбором расположения станций и наличием современного ГНСС-оборудования, а также длительным сеансом ГНСС-измерений.

При сравнении координат XYZ с контрольными значениями наблюдаются систематические смещения по координате X, что может быть связано как с особенностью используемого метода PPP, так и с ошибками приведения координат к одной и той же эпохе.

Разница измеренных геодезических высот с контрольными значениями в большинстве случаев не превышает СКП их определения. Расхождения высот,

превышающие доверительный интервал, задаваемый СКП, возможно, объясняются наличием вертикальных смещений на территории региона.

Главной выявленной и ожидаемой особенностью ГНСС-измерений в горной местности был разброс зенитной тропосферной задержки, на соседних станциях – до 40 см. Формирование сетевого решения NetWorRTK в горной местности осложняется большими изменениями тропосферной задержки в пространстве и во времени, и необходимы дополнительные исследования по данному направлению.

Полученный опыт будет полезен при проектировании и запуске работы дифференциальных геодезических станций в Афганистане.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наджибулла Х.З., Обиденко В.И. Создание и развитие дифференциальных геодезических станций в горной местности //Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2022.Т. 1. – С. 113-123. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-1-113-123
2. Наджибулла Х.З., Гиенко Е.Г. Основные направления развития государственной координатной основы в Афганистане // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т.28, №2. – С. 49-58. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-4-49-58.
3. EFT CORS, Сеть базовых станций CORS // EFT CORS.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://bp.eft-cors.ru/basestations>.
4. EarthScope Consortium, UNAVCO // Plate Motion Calculator [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>.
5. Терещенко В. Е., Анализ качества спутниковых измерений с помощью программной утилиты TEQC. // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т.25, № 3. – С. 72–88.
6. Карпик А.П., Мареев А.В., Мамаев Д.С., Дорогова И.Е. Мониторинг качества спутниковых измерений на пунктах ФАГС// Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2023.Т. 1, №2. – С.306-312. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-2-306-312
7. CSRS-PPP, CANADIAN GEODETIC SURVEY // Natural Resources Canada [Электронный ресурс]. URL: <https://webapp.csrscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.
8. Gratton, Paul, et al., Kinematic zenith tropospheric delay estimation with GNSS PPP in mountainous areas. // Sensors 2021. № 17 (21). С. 5709.

© Х. З. Наджибулла, Е. Г. Гиенко, 2024