

УДК 528.06.1:629.783

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-26-33

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СПУТНИКОВЫМИ ПРИЕМНИКАМИ EFT M3 GNSS И EFT M4 GNSS В РЕЖИМЕ RTK

Александр Викторович Елагин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)361-01-59, e-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

Михаил Викторович Зайцев

ООО «Эффективные технологии Центр», 630048, Россия, г. Новосибирск, пл. Маркса, 7, инженер, тел. (383)383-23-71, e-mail: zmv@eftgroup.ru

Дмитрий Анатольевич Прохоров

ООО «Эффективные технологии Центр», 630048, Россия, г. Новосибирск, пл. Маркса, 7, руководитель регионального представительства, тел. (383)383-23-71, e-mail: nsk@eftgroup.ru

Николай Кириллович Шендрик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, зав. лабораторией кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)361-01-59, e-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

В работе представлены результаты тестирования спутниковых приемников EFT M3 GNSS и EFT M4 GNSS в режиме «Real Time Kinematic» (RTK). На десяти пунктах вблизи постоянно действующей базовой станции NSKW были выполнены измерения в режиме RTK тестируемыми приемниками и в режиме «статика» приемником Trimble 5700. Кроме этого, определены нормальные высоты пунктов из нивелирования II класса нивелиром Н-05. Пункты удалены от базовой станции на расстояния от 39 до 1 227 м. Оценка точности выполнена по разностям двойных неравноточных измерений в режиме RTK и «Статика». Для дополнительного контроля оценки точности определения высот использованы разности нормальных и геодезических высот. В работе показано, что средняя квадратическая погрешность измерений в режиме RTK не превосходит 16 мм в плане и по высоте. В режиме RTK современные ГНСС-приемники EFT M3 GNSS и EFT M4 GNSS позволяют достичь сантиметрового уровня точности определения пространственных координат пунктов. Погрешности тестируемых приемников в режиме RTK сопоставимы.

Ключевые слова: ГНСС, RTK, статика, оценка точности, геометрическое нивелирование.

Введение

В настоящее время развитая сеть базовых станций и современная спутниковая аппаратура в совокупности позволяют в режиме RTK почти мгновенно получать координаты на сантиметровом уровне точности [1–13]. Группа компаний EFT GROUP предоставила Сибирскому государственному университету геосистем и технологий (СГУГиТ) два ГНСС-приемника последних моделей EFT M3 GNSS (M3) и EFT M4 GNSS (M4) для их тестирования в режиме RTK и оказала непосредственное содействие в проведении изме-

рений. Для оценки точности определения координат в мае-июне 2019 г. в режиме RTK были выполнены измерения приемниками M3 и M4, а в режиме «Статика» – приемником Trimble 5700 (Т). Были измерены геодезические широты, долготы, высоты и нормальные высоты на десяти пунктах, удаленных от базовой станции NSKW на расстояния от 39 до 1 227 м. Измерения выполнены во время учебных практик обучающимися групп БГ-31 и МГ-11.

Оценка точности произведена по разностям двойных неравноточных измерений [14, 15]. Для внешнего контроля точности определе-

ния высот нивелиром Н-05 (N) были определены нормальные высоты с использованием методики геометрического нивелирования II класса. Схема сети представлена на рис. 1.

В табл. 1 показаны априорные значения средних квадратических погрешностей (СКП)

ГНСС-приемников и нивелира.

Средние квадратические погрешности ГНСС-приемников М3, М4 и Т взяты с сайтов производителей аппаратуры (<http://www.eft-survey.ru>, <http://www.trimble.com>), а СКП нивелирования II класса – из работы [14].

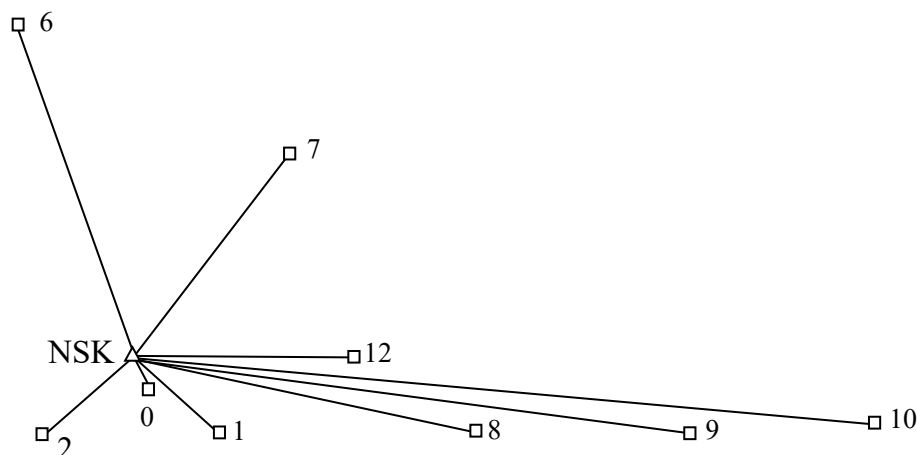


Рис. 1. Схема геодезической сети:

△ – базовая станция геодезической сети; □ – пункт геодезической сети

Таблица 1

Априорные значения средних квадратических погрешностей измерений ГНСС-приемников и нивелира

Инструмент	Сокращ. назв.	Режим работы в эксперименте	Априорная СКП в плане $m_{pl} = \bar{a} + \bar{b} \cdot S$	Априорная СКП по высоте $m_h = \bar{a} + \bar{b} \cdot S$
EFT M3 GNSS	M3	RTK	$\pm 8 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$	$\pm 15 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$
EFT M4 GNSS	M4	RTK	$\pm 5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$	$\pm 10 \text{ мм} + 0,8 \text{ мм/км}$
Trimble 5700	T	Статика	$\pm 5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$	$\pm 5 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$
Нивелир Н-05	N	Нивелирование II класса	–	$\pm 3,6 \text{ мм/км}$

Методика измерений

Приемник М3 устанавливался над пунктами по уровню на вешке с биподом. Это позволяло фиксировать его во время измерений и не держать в руках.

Второй приемник М4 устанавливался по уровню на простой вешке и без жесткой фиксации во время измерений. Измерения на каждом пункте длились приблизительно 10 секунд.

При измерении приемником Т в режиме «Статика» антенна приемника устанавливалась на штативе с треггером, который центрировался над пунктами с помощью оптического центрира. Измерения на каждом пункте в режиме «Статика» выполнялись в течение одного часа.

Нивелирование II класса выполнялось нивелиром N по инварным трехметровым рейкам в прямом и обратном направлениях. Пункт Т0 расположен на земной поверхно-

сти на расстоянии 39 м в плане от базовой станции NSKW, которая находится на крыше здания СГУГиТ. Для передачи нормальной высоты с пункта Т0 на пункт NSKW использовалось геодезическое превышение высот, измеренное в статике спутниковым приемником Т.

По априорным данным уклонение отвесной линии на пункте NSKW не превышает 3" [2]. При таком УОЛ предварительные расчеты показали, что погрешность передачи высоты не превысила 1 мм.

Процесс измерений приемниками М3 и Т показан на рис. 2.



Рис. 2. Измерения приемниками М3 и Т

Оценка точности

Вычисление СКП единицы веса μ выполнялось по разностям двойных неравноточных измерений d_i на девяти пунктах по формулам [15–26]:

$$d_i = l_i'' - l_i'; \quad (1)$$

$$\omega = \frac{[d]}{[S]}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = d_i - \omega \cdot S_i, \quad i = 1, 2, \dots, 9; \quad (3)$$

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{[P_d \cdot \varepsilon^2]}{n-1}}, \quad (4)$$

где l_i'' , l_i' – неравноточные измерения, выполненные двумя приемниками в каждой точке; ω – систематическая погрешность на 1 км; S_i – расстояние от базовой станции до пунктов сети; ε – разность с исключенными систематическими погрешностями; P_d – веса разностей измерений; n – число разностей.

Веса разностей находились из выражений

$$P_{d_i} = \frac{p_i' \cdot p_i''}{p_i' + p_i''}, \quad i = 1, 2, \dots, 9. \quad (5)$$

В формуле (5) на место p_i' подставлялись веса измерений приемников М3 или М4, а на место p_i'' вес измерения приемником Т либо вес нормальной высоты, полученной из нивелирования II класса. Веса измерений определялись по априорным СКП, представленным в табл. 1. Вес уменьшался в связи с увеличением СКП при удалении от базовой станции и определялся из соотношений

$$m' \text{ или } m'' = \bar{a} + \bar{b} \cdot S_i, \quad (6)$$

$$p_i' = \frac{m_1'^2}{m_i'^2}, \quad p_i'' = \frac{m_1''^2}{m_i''^2}, \quad i = 1, 2, \dots, 9, \quad (7)$$

где \bar{a} и \bar{b} – выбирались, в зависимости от используемых приемников, из табл. 1.

Веса измерений приемников М3 и М4 на пункте б, при $i = 1$, принимались за единицу. После определения СКП единицы веса из

выражений (1)–(7), СКП измерения координат пунктов сети приемниками М3 и М4 определялись по формуле

$$m'_i = \frac{\mu}{\sqrt{p'_i}}, \quad i = 1, 2, \dots, 9.$$

Разностями измерений являлись разности геодезических широт, долгот, высот и разности нормальных высот:

$$\Delta B_i = B''_i - B'_i; \quad \Delta L_i = L''_i - L'_i;$$

$$\Delta h_i = H''_i - H'_i; \quad \Delta hn_i = H''_i - (H'_i - \zeta),$$

где ζ – высота квазигеоида на базовой станции NSKW.

Для наглядности, разности геодезических широт и долгот преобразованы в линейные величины Δx и Δy с использованием соотношений

$$M_i = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B''_i)^{3/2}}; \quad N_i = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B''_i}};$$

$$\Delta x_i = M_i \Delta B_i; \quad \Delta y_i = N_i \cos B''_i \Delta L_i;$$

$$i = 1, 2, \dots, 9,$$

где a, e^2 – соответственно, большая полуось и квадрат эксцентриситета эллипсоида системы координат WGS-84.

Результаты оценки точности

Двойные разности неравноточных измерений представлены в табл. 2.

Средние квадратические погрешности определения координат пунктов приемниками М3 и М4 в режиме RTK представлены в табл. 3.

Таблица 2

Разности измерений

Номера пунктов	Расстояние S от NSKW, м	Разности, мм							
		Т-М3			N-М3	Т-М4			N-М4
		Δx	Δy	Δh	Δhn	Δx	Δy	Δh	Δhn
0	39	-5,2	-5,7	-9,0	-9,0	-5,2	-13,5	-13,0	-13,0
2	242	+10,8	-2,5	+14,0	+3,0	+7,4	-6,6	+5,0	-6,0
1	244	-12,3	-14,0	+11,0	-11,0	0,0	-34,0	-8,0	-30,0
12	431	-0,3	+2,8	-7,0	-13,0	-1,8	+4,4	+5,0	-1,0
8	579	-4,6	-11,7	+8,0	+8,0	+22,5	+0,5	+10,0	+10,0
7	649	-1,8	-8,2	+8,0	-2,0	-2,5	-7,3	-9,0	-19,0
6	831	+3,4	+1,1	+2,0	+3,0	+5,8	-9,1	+5,0	+6,0
9	955	+15,7	-0,4	-2,0	-1,0	+6,5	+2,7	-8,0	-7,0
10	1227	-1,5	+10,8	+10,0	+12,0	-5,5	+15,1	+8,0	+10,0

Таблица 3

Средние квадратические погрешности определения координат пунктов в режиме RTK

Номера точек	S, м	Средние квадратические погрешности, мм											
		М3						М4					
		m_x	m_y	m_h	m_{pl}	m_{pr}	m_{hn}	m_x	m_y	m_h	m_{pl}	m_{pr}	m_{hn}
0	39	6,7	7,2	7,6	9,8	12,4	8,7	6,0	11,0	6,1	12,5	13,9	14,9
2	242	6,9	7,4	7,7	10,1	12,7	8,8	6,1	11,2	6,2	12,8	14,2	15,1
1	244	6,9	7,4	7,7	10,1	12,7	8,8	6,1	11,2	6,2	12,8	14,2	15,1
12	431	7,1	7,5	7,8	10,3	12,9	8,9	6,2	11,4	6,3	13,0	14,4	15,3
8	579	7,2	7,7	7,9	10,5	13,1	9,0	6,3	11,6	6,4	13,2	14,7	15,5
7	649	7,3	7,7	7,9	10,6	13,2	9,0	6,3	11,6	6,4	13,2	14,7	15,6
6	831	7,4	7,9	8,0	10,8	13,4	9,1	6,5	11,8	6,5	13,5	15,0	15,8
9	955	7,5	8,0	8,1	11,0	13,7	9,2	6,5	12,0	6,6	13,6	15,1	16,0
10	1227	7,7	8,2	8,2	11,2	13,9	9,3	6,7	12,3	6,7	14,0	15,5	16,3

В табл. 3 используются следующие обозначения СКП:

m_x – СКП геодезической широты в линейной мере;

m_y – СКП геодезической долготы в линейной мере;

m_h – СКП геодезической высоты;

$m_{pl} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}$ – СКП в плане;

$m_{pr} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_h^2}$ – СКП в пространстве;

m_{hn} – СКП геодезической высоты, полученная с использованием разностей нормальных высот.

Из табл. 2 и 3 выписаны максимальные разности координат и максимальные СКП, полученные для приемников М3 и М4. Они представлены в табл. 4.

Таблица 4

Максимальные разности и СКП, мм

М3				М4			
Δx	+15,7	m_x	7,7	Δx	+22,5	m_x	6,7
Δy	-14,0	m_y	8,2	Δy	-34,0	m_y	12,3
Δh	+14,0	m_h	8,2	Δh	-13,0	m_h	6,7
Δhn	-13,0	m_{hn}	9,3	Δhn	-30,0	m_{hn}	16,3

Из табл. 4 видно, что спутниковый приемник М3 практически подтвердил данные табл. 1, показал себя с лучшей стороны при определении плановых координат, по сравнению с приемником М4. И это несмотря на то, что у приемника М4 априорные СКП в режиме RTK в полтора раза меньше, чем у приемника М3 (см. табл. 1). СКП по высоте у приемников М3 и М4 почти совпадают и соответствуют данным табл. 1. По-видимому, большую роль сыграло то, что приемник М3 устанавливался по уровню на вешке с биподом. Он жестко фиксировался во время измерений и его не нужно было держать в руках. Приемник М4 был закреплен на простой вешке с уровнем и его невозможно было твердо зафиксировать над пунктами. Отклонения центра антенны от вертикали, проходящей через пункт во время измерений приемником М4, практически не повлияли на определение геодезической высоты пункта, но оказали влияние на определение плановых координат. Целесообразно для повышения точности определения координат рекомендовать вместо простой вешки при выполнении работ использовать вешки с биподами.

Что касается большого отклонения $\Delta hn = -30,0$ мм на пункте 1 в разности нормальных высот при измерении приемником

М4, то, возможно, некоторую роль сыграло неучтенное уклонение отвесной линии и особые условия наблюдения на этом пункте (рядом с высоким металлическим забором).

Заключение

В представленной статье выполнена оценка точности определения координат ГНСС-приемниками М3 и М4 фирмы EFT в режиме RTK. Оценка точности выполнена по разностям двойных неравноточных измерений. Разности получены путем вычитания измеренных приемниками М3 и М4 в режиме RTK геодезических координат B, L, H , из геодезических координат, измеренных в режиме «Статика» приемником Т.

Для контроля оценки точности определения геодезических высот на пунктах сети были получены нормальные высоты из геометрического нивелирования II класса. Результаты эксперимента показали, что в режиме RTK приемники М3 и М4 позволяют определять координаты пунктов на сантиметровом уровне точности. Для повышения точности определения координат рекомендуется использовать вешки с уровнем и биподами, которые жестко фиксируют приемники над пунктами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. В 2 т. Т. 2. – М. : Картогеоцентр, 2006. – 360 с.
2. Сеть базовых станций ПРИН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.prin.ru/seti_referencyh_stancij/.
3. SmartNet Russia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://smartnet-ru.com/index.htm>.
4. EFT. Базовые станции на территории РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eft-cors.ru/>.
5. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more. – Wien, New-York : Springer, 2008. – 516 p.
6. Reach High accuracy L1 RTK GNSS [Электронный ресурс] // EMLID. – Режим доступа: <http://emlid.com/reach/>.
7. Leick A. GPS Satellite Surveying. – New York : A Willey-Interscience Publication, 2004. – 464 p.
8. Аврунев Е. И. Использование активных базовых станций при выполнении кадастровых работ в отношении объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 135–145.
9. Юнес Ж. А., Мустафин М. Г., Морозова В. Д. Создание опорной маркшейдерской сети с использованием технологии спутникового позиционирования // Маркшейдерский вестник. – 2017. – № 2 (117). – С. 25–28.
10. Шендрик Н. К. Методика выноса проектных точек на местность в WGS-84 // Геопрофи. – 2016. – № 5. – С. 44–46.
11. Xu Guochang. GPS. Theory, algorithms and applications (2nd ed.). – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007. – 350 p.
12. GPS for geodesy / P. J. G. Teunissen, Y. Bock, G. Beutler [et al.]. Teunissen P. J. G., Kleusberg A. (Eds.). – Berlin : Springer, 1998. – 650 p.
13. Seeber G. Satellite Geodesy. – 2-nd edition. – Berlin, New York : Walter de Gruyter, 2003. – 589 p.
14. Яковлев Н. В. Высшая геодезия. – М. : Недра, 1989. – 382 с.
15. Папазов М. Г., Могильный С. Г. Теория ошибок и способ наименьших квадратов. – М. : Недра, 1968. – 302 с.
16. Гиенко Е. Г., Решетов А. П., Струков А. А. Исследование точности получения нормальных высот и уклонов отвесной линии на территории Новосибирской области с помощью глобальной модели геоида EGM2008 // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19 – 29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1. ч. 2. – С. 164–168.
17. Барлиани А. Г. Методы обработки и анализа пространственных и временных данных : монография. – Новосибирск : СГГА, 2016. – 188 с.
18. Карпик А. П., Варламов А. А., Аврунев Е. И. Совершенствование методики контроля качества спутникового позиционирования при создании геоинформационного пространства территориального образования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 185–188.
19. Маркузе Ю. И., Голубев В. В. Теория математической обработки геодезических измерений : учеб. пособие. – М. : Академический Проект; Альма Матер, 2010. – 247 с.
20. Wells D. E., Krakiwsky E. J. The Method of least squares. – Canada : University of New Brunswick, 1971. – 192 p.
21. Teunissen P. J. G. Adjustment theory (an introduction). – Delft University Press, 2000. – 193 p.
22. Kubáček L. Statistical theory of geodetic networks. – Zdíby : Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, 2013. – 286 p.
23. Падве В. А. Математическая обработка и анализ результатов геодезических измерений: монография. В 2 ч. Ч. 1. Основы теории погрешностей измерений и фундаментальные алгоритмы точностной МНК-оптимизации результатов измерений. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 163 с.
24. Машимов М. М. Уравнивание геодезических сетей : учеб. пособие для вузов. – М. : Недра, 1979. – 367 с.
25. Шендрик Н. К. Исследование точности геодезической сети активных базовых станций Новосибирской области в государственной системе координат и высот // Геодезия и картография. – 2014. – № 1. – С. 2–7.
26. Телеганов Н. А., Елагин А. В. Высшая геодезия и основы координатно-временных систем. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 238 с.

Получено 06.02.2020

© А. В. Елагин, М. В. Зайцев, Д. А. Прохоров, Н. К. Шендрик, 2020

ESTIMATION OF COORDINATES ACCURACY DETERMINATION BY EFT M3 GNSS AND EFT M4 GNSS SATELLITE RECEIVERS IN RTK MODE

Alexandr V. Elagin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)361-01-59, e-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

Mikhail V. Zaitsev

Effective Technologies Center LLC, 7, Marx Square, Novosibirsk, 630048, Russia, Engineer, phone: (383)383-23-71, e-mail: zmv@eftgroup.ru

Dmitry A. Prokhorov

Effective Technologies Center LLC, 7, Marx Square, Novosibirsk, 630048, Russia, Head of the Regional Representative Office, phone: (383)383-23-71, e-mail: nsk@eftgroup.ru

Nikolay K. Shendrik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Head of Laboratory, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)361-01-59, e-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

The paper presents the test results of satellite receivers EFT M3 GNSS and EFT M4 GNSS in Real Time Kinematic (RTK) mode. At ten points near the NSKW permanent operating base station, measurements were made in the RTK mode by the tested receivers and in the "static" mode by the Trimble 5700 receiver. In addition, the normal heights of points from leveling of class II with the N-05 level were determined. The points are removed from the base station at distances from 39 m to 1227 m. The accuracy was estimated by the differences of double non-equal measurements in the RTK and "static" modes. For additional control of the accuracy estimation in determining the heights, differences of normal and geodetic heights are used. The work shows that the mean square error of measurements in the RTK mode does not exceed 16 mm in plan and height. In RTK mode, modern GNSS receivers EFT M3 GNSS and EFT M4 GNSS can achieve a centimeter level of accuracy in determining the spatial coordinates of points. The errors of the tested receivers in RTK mode are comparable.

Key words: GNSS, RTK, statics, accuracy estimation, geometric leveling.

REFERENCES

1. Antonovich, K. M. (2006). *Ispol'zovanie sputnikovyh radionavigacionnyh system v geodezii: T. 2 [Using satellite radio-navigation systems in geodesy: Vol. 2]*. Moscow: Cartgeocentr Publ., 360 p. [in Russian].
2. PRIN network of base stations. (n. d.). Retrieved from http://www.prin.ru/seti_referencyh_stancij/ [in Russian].
3. SmartNet Russia. (n. d.). Retrieved from <http://smarnet-ru.com/index.htm> [in Russian].
4. EFT. Base station on the territory of the Russian Federation. (n. d.). Retrieved from <http://eft-cors.ru/> [in Russian].
5. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more*. Wien, New-York: Springer, 516 p.
6. Reach High accuracy L1 RTK GNSS. (n. d.). Retrieved from <http://emlid.com/reach/>.
7. Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. New York: A Willey-Interscience Publication, 464 p.
8. Avrunev, E. I. (2019). Use of active basic stations in the performance of cadastral works with respect to real estate objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 135-145 [in Russian].
9. Younes, Z. A., Mustafin, M. G., & Morozova, V. D. (2017). Creation of a support surveying network using satellite positioning technology. *Markshejderskij vestnik [Mine Surveying News]*, 2(117), 25 – 28 [in Russian].
10. Shendrik, N. K. (2016). Methods of removal of design points on the terrain in the WGS-84. *Geoprofi [Geoprofi]*, 5, 44–46 [in Russian].

11. Xu Guochang. (2007). *GPS. Theory, algorithms and applications* (2nd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 350 p.
12. Teunissen, P. J. G., Bock, Y., & Beutler, G. (1998). *GPS for geodesy*. Teunissen P. J. G., Kleusberg A. (Eds.). Berlin: Springer, 650 p.
13. Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy* (2nd ed.). Berlin, New York: Walter de Gruyter, 589 p.
14. Yakovlev, N. V. (1989). *Vysshaya geodeziya [Higher geodesy]*. Moscow: Nedra Publ., 382 p. [in Russian].
15. Papazov, M. G., & Mogilny, S. G. (1968). *Teoriya oshibok i sposob naimenshikh kvadratov [Theory of errors and the method of least squares]*. Moscow: Nedra Publ., 302 p. [in Russian].
16. Gienko, E. G., Reshetov, A. P., & Strukov, A. A. (2011). Research of normal height and vertical deflection determination accuracy on Novosibirsk region territory by the global model of geoid EGM2008. In *Sbornik materialov GEO-Sibir-2011: T. 1, ch. 2. [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 1, Part 2]* (pp. 164–168). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
17. Barliani, A. G. (2016). *Metody obrabotki i analiza prostranstvennykh i vremennykh dannykh [Methods of processing and analysis of spatial and temporal data]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 188 p. [in Russian].
18. Karpik, A. P., Varlamov, A. A., & Avrunev, E. I. (2014). Improving methods for quality control of satellite positioning when creating geo-space territorial education. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 182–186 [in Russian].
19. Markuze, Yu. I., & Golubev, V. V. (2010). *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy [Theory of mathematical processing of geodetic measurements]*. Moscow: Academic Project: Al'ma Mater Publ., 247 p. [in Russian].
20. Wells, D. E., & Krakiwsky, E. J. (1971). *The Method of least squares*. Canada: University of New Brunswick Publ., 192 p.
21. Teunissen, P. J. G. (2000). *Adjustment theory (an introduction)*. Delft University Press, 193 p.
22. Kubáček, L. (2013). *Statistical theory of geodetic networks*. Zdiby: Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, 286 p.
23. Padve, V. A. (2015). *Matematicheskaya obrabotka i analiz rezul'tatov geodezicheskikh izmereniy: Ch. 1, Osnovy teorii pogreshnostej izmerenij i fundamental'nye algoritmy tochnostnoj MNK-optimizacii rezul'tatov izmerenij [Mathematical processing and interpretation of the results of geodetic measurements: Part 1, Fundamentals of the theory of measurement errors and the fundamental algorithms of the precision OLS optimization measurements]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 163 p. [in Russian].
24. Mashimov, M. M. (1979). *Uravniwanie geodezicheskikh setey [Adjustment geodetic networks]*. Moscow: Nedra Publ., 367 p. [in Russian].
25. Shendrik, N. K. (2014). The investigation of precision geodetic network of active base stations Novosibirsk region in the state system of coordinates and altitudes. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 1, 2–7 [in Russian].
26. Teleganov, N. A., & Elagin, A. V. (2004). *Vysshaya geodeziya i osnovy koordinatno-vremennykh system [Higher geodesy and fundamentals of coordinate-time systems]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 238 p. [in Russian].

Received 06.02.2020

© A. V. Elagin, M. V. Zaitsev, D. A. Prokhorov, N. K. Shendrik, 2020