

СТАТЬЯ

УДК 528.02

**СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ,  
КООРДИНАТЫ КОТОРЫХ ОПРЕДЕЛЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕТОДА ВЫСОКОТОЧНЫХ КООРДИНАТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ  
И КЛАССИЧЕСКОЙ ПОСТОБРАБОТКОЙ**

**Макаров С.О., Тихонов А.Д.**

*ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, e-mail: makstas96@yandex.ru;  
ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», Москва*

Современное ПО для постобработки позволяет выполнять вычисление и по PPP алгоритму, но в статье обращается внимание на использование открытых (бесплатных) сервисов. В статье рассматривается определение погрешности приращений координат при использовании современных методов обработки данных. В качестве экспериментальной модели сформирована спутниковая сеть, пункты которой расположены в диапазоне расстояний 4–409 км. Было выполнено сравнение данных, получаемых при обработке по PPP-алгоритму в сравнении с обработкой в статике. По PPP-алгоритму была выполнена обработка с использованием двух интернет-сервисов Trimble RTX и CRSR. Для обработки в статике было использовано программное обеспечение КРЕДО ГНСС. В сравнении разностей приращений координат между собой было выявлено, что среднее отличие при двух- и трехчасовых измерениях минимально и составляет в среднем 3 мм. Научная новизна заключается в том, что производится сравнение разностей приращений координат в случае многократных измерений при использовании PPP-технологий. В качестве факторов, влияющих на точность, рассмотрены: продолжительность измерений, влияние количества принимаемых спутников, влияние pdop фактора и возможность применения многократных спутниковых измерений при обработке в статике и по PPP-алгоритму.

**Ключевые слова:** геодезические спутниковые сети, точность определения координат, методы высокоточных координатных определений (ppp)

**COMPARISON OF THE ACCURACY OF GEODETIC NETWORKS,  
THE COORDINATES OF WHICH ARE DETERMINED USING THE PRECISE  
POINT POSITIONING ALGORITHM AND CLASSICAL POST-PROCESSING**

**Makarov S.O., Tikhonov A.D.**

*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, e-mail: makstas96@yandex.ru;  
State University of Land Management, Moscow*

Modern post-processing software allows you to perform calculations using the PPP algorithm, but the article draws attention to the use of open (free) services. The article considers the determination of the error of coordinate increments when using modern data processing methods. As an experimental model, a satellite network was formed, the points of which are located in the distance range of 4–409 km. A comparison of the data obtained during processing by the PPP algorithm in comparison with processing in static was performed. According to the PPP algorithm, processing was performed using 2 Trimble RTX and CRSR Internet services. The GNSS CREDO software was used for static processing. Comparing the differences in the increments of coordinates among themselves, it was found that the average difference between 2 and 3 hour measurements is minimal and averages 3 mm. The scientific novelty lies in the fact that the differences in the increments of coordinates are compared in the case of multiple measurements. As factors affecting the accuracy, the following are considered: the duration of measurements, the influence of the number of received satellites, the influence of the pdop factor, and the possibility of using multiple satellite measurements when processing in statics and using the PPP- algorithm.

**Keywords:** geodetic satellite networks, accuracy of coordinate determination, Precise Point Positioning (PPP)

На сегодняшний день существуют различные методы спутникового позиционирования, в том числе инновационные. Одним из таких методов является Precise Point Positioning или, по-другому, метод высокоточных координат определений (далее «PPP») [1].

Метод точного позиционирования (далее «PPP») относится к абсолютным определениям местоположения, основан на применении спутниковой корректирующей информации, содержащей поправки к эфемеридам и времени бортовых часов навигационных спутников и атмосферных поправок в пределах локальной области, позволяющий опре-

делять пространственные координаты объектов с достаточно высокой точностью.

Помимо этого существует следующая классификация PPP-методов:

PPP (Float PPP) – реализация метода без разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.

PPP-AR (Integer PPP) – с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.

PPP-RTK – с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений и использованием атмосферных поправок в пределах локальной области.

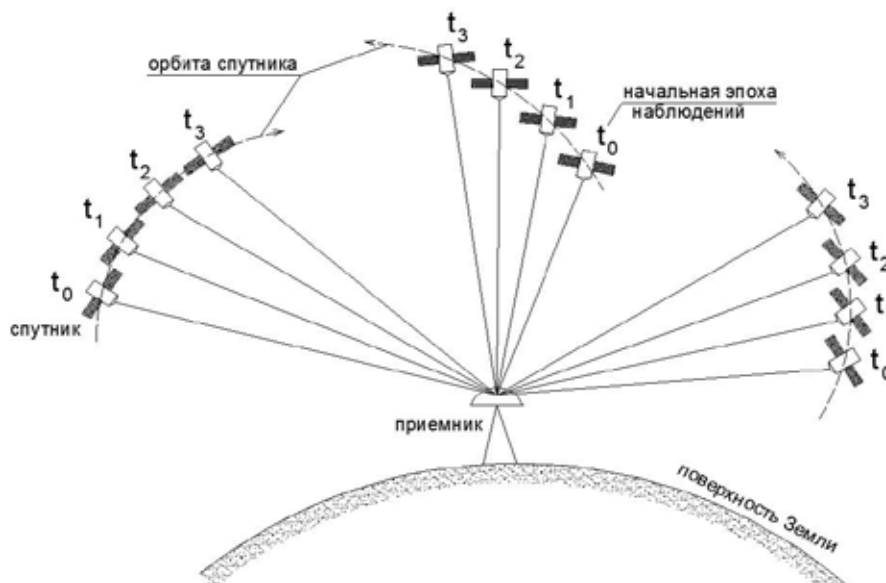


Рис. 1. Схема PPP-метода

Метод PPP можно реализовать как в апостериорном режиме, так и в режиме реального времени. В первом случае результат получают в процессе камеральной обработки или с помощью специализированных сервисов.

Для точного определения пространственного положения точки метод PPP используется ионосферно-свободная комбинация двух несущих частот [2, 3]. В общем виде для одного спутника и приемника комбинация представлена в виде формулы

$$P_A^i = \rho + c(dt - dT) + Tr + \varepsilon_p$$

$$\Phi_{if}^i = \rho + c(dt - dT) + Tr + N\lambda + \varepsilon_\phi$$

где  $\Phi_{if}^i$ ,  $P_A^i$  – ионосферная комбинация несущих фаз (L1, L2) и псевдодальностей (P1, P2);  $dt$ ,  $dT$  – ошибка часов приемника и спутника (так называемый сдвиг шкал относительно системной шкалы времени (далее «СШВ»));  $c$  – скорость распространения радиоволн в вакууме;  $Tr$  – тропосферная задержка;  $N$  – целочисленные колебания несущей фазы;  $\lambda$  – длина несущей волны;  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_\phi$  – различные шумовые компоненты, включающие многолучевость (многопутность),  $\rho$  – расстояние между спутником и приемником.

На рис. 1 изображена обобщенная схема PPP-методов.

Для получения устойчивого решения при использовании PPP-метода необходимо, чтобы продолжительность измерений составляла не менее 2 ч. Однако существует возможность обработки и 10-минутных измерений, но в таком случае получается не-

точное решение. Помимо этого, частота записи должна составлять не менее 10 с [2].

На сегодняшний день существуют два подхода к обработке по PPP-алгоритму: с использованием программных обеспечений и интернет-сервисов. В качестве программных обеспечений можно выделить следующие: Trimble Business Centre (далее «ТВС»), КРЕДО ГНСС, RTK LIB. Среди интернет-сервисов – Trimble RTX, APPS, CRSR, magic GNNS. В каждом из интернет-сервисов предоставляется бесплатный, не ограниченный по времени доступ в отличие от программных обеспечений [3].

Цели исследования:

1. Сравнить результаты обработки в статике и PPP при многократных спутниковых измерениях.
2. Проанализировать влияние продолжительности измерений на получаемые разности приращений координат.
3. Проанализировать влияние rdop фактора и количества принимаемых спутников на получаемые разности приращений координат.

#### Материалы и методы исследования

В качестве экспериментальной модели была сформирована спутниковая сеть, состоящая из 5 пунктов. 4 пункта сети входят в состав сети базовых станций EFT-COORS, где были получены RINEX [4–7]. В свою очередь, эталонные координаты 5 пункта получены самостоятельно при использовании двухчастотного спутникового приемника Trimble R10.



Рис. 2. Схема спутниковой сети

На рис. 2 изображена спутниковая сеть, включающая в себя 5 пунктов.

Пункты спутниковой сети находятся на расстояниях от 4 (MSK-МИИТ) до 409 (LOBN-NNV) км. Средние расстояния между пунктами – 210 км.

В свою очередь измерения производились по 3 часа каждый день в течение 12 дней. Для обработки данных по PPP-алгоритму было использовано два интернет-сервиса Trimble RTX и CRSR [8]. Основываясь на координатах, были получены приращения координат. В дальнейшем были определены разности приращений координат между определенными и эталонными приращениями.

Помимо этого, были определены координаты с использованием CRSR, после чего

были высчитаны приращения и разности приращений координат [9].

Для контроля получаемых разностей приращений координат была выполнена обработка базовых линий (векторов) с добавлением высокоточных (финальных) эфемерид в программном обеспечении КРЕДО ГНСС [10]. В качестве исходного (опорного) пункта был выбран пункт МИИТ.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 и 2 приводится сравнение усредненных разностей приращений координат; в табл. 3 и 4 – максимальные разности приращений координат; в табл. 5 и 6 – минимальные разности.

Таблица 1

Сравнение средних разностей приращений координат при продолжительности измерений 1 час

Линия	Статика – КРЕДО			PPP-RTX			PPP-CRSR		
	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м
MSK-МИИТ	0,019	-0,002	-0,035	0,012	-0,009	0,014	0,014	-0,010	0,015
KOST-МИИТ	-0,021	0,025	0,009	0,000	-0,002	-0,011	0,006	0,004	0,000
LOBN-МИИТ	0,041	0,036	-0,034	0,004	-0,005	-0,002	0,004	0,000	0,030
NNV-МИИТ	0,008	0,014	0,008	-0,001	0,007	-0,003	0,014	0,021	0,033
MSK-KOST	0,031	-0,029	-0,020	0,012	-0,006	0,025	0,008	-0,014	0,015
MSK-LOBN	0,000	-0,033	-0,014	0,008	-0,004	0,016	0,010	-0,010	-0,014
MSK-NNV	0,012	-0,013	-0,012	0,014	-0,016	0,017	0,001	-0,031	-0,017
KOST-LOBN	-0,034	0,002	-0,007	-0,004	0,003	-0,009	0,002	0,004	-0,030
KOST-NNV	0,021	-0,014	-0,008	0,002	-0,010	-0,008	-0,008	-0,018	-0,033
LOBN-NNV	0,007	0,020	0,007	0,006	-0,012	0,001	-0,010	-0,021	-0,003

Таблица 2

Сравнение средних разностей приращений координат  
 при продолжительности измерений 2 часа

Линия	Статика – КРЕДО			PPP-RTX			PPP-CRSR		
	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м
MSK-МИТ	0,020	0,001	-0,031	0,012	-0,007	0,004	0,010	-0,008	0,001
KOST-МИТ	-0,008	-0,018	0,003	0,002	0,002	-0,014	0,010	0,013	0,008
LOBN-МИТ	-0,001	0,023	0,037	0,005	-0,001	-0,007	0,005	0,008	0,008
NNV-МИТ	-0,008	0,003	0,012	-0,002	0,010	-0,008	0,003	0,015	-0,007
MSK-KOST	0,014	-0,021	-0,001	0,010	-0,009	0,018	0,000	-0,022	-0,007
MSK-LOBN	-0,007	0,003	-0,012	0,006	-0,006	0,010	0,005	-0,017	-0,007
MSK-NNV	0,041	0,046	0,048	0,014	-0,017	0,012	0,007	-0,024	0,008
KOST-LOBN	-0,033	0,015	0,014	-0,004	0,003	-0,008	0,005	0,005	0,000
KOST-NNV	-0,015	-0,012	-0,033	0,004	-0,008	-0,006	0,006	-0,002	0,015
LOBN-NNV	0,028	0,052	0,065	0,008	-0,011	0,002	0,002	-0,007	0,015

Таблица 3

Сравнение максимальных разностей приращений координат  
 при продолжительности измерений 1 час

Линия	Статика – КРЕДО			PPP-RTX			PPP-CRSR		
	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м
MSK-МИТ	0,020	0,001	-0,032	0,024	-0,001	0,037	0,028	0,001	0,033
KOST-МИТ	-0,018	0,064	0,036	0,010	0,003	0,000	0,015	0,011	0,007
LOBN-МИТ	0,043	0,043	0,059	0,013	0,003	0,017	0,016	0,023	0,048
NNV-МИТ	0,016	0,044	0,018	0,005	0,015	0,020	0,028	0,039	0,047
MSK-KOST	0,049	0,005	-0,002	0,017	-0,001	0,037	0,013	-0,009	0,027
MSK-LOBN	0,010	-0,003	0,010	0,015	0,002	0,030	0,021	0,005	0,010
MSK-NNV	0,058	0,047	0,041	0,021	-0,010	0,044	0,006	-0,024	0,010
KOST-LOBN	-0,029	0,003	0,016	0,008	0,011	0,005	0,014	0,016	-0,003
KOST-NNV	0,028	-0,012	-0,006	0,009	-0,006	0,014	0,005	-0,010	-0,012
LOBN-NNV	0,017	0,057	0,049	0,010	-0,007	0,023	-0,003	-0,002	0,009

Таблица 4

Сравнение максимальных разностей приращений координат  
 при продолжительности измерений 2 часа

Линия	Статика – КРЕДО			PPP-RTX			PPP-CRSR		
	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м
MSK-МИТ	0,025	0,001	-0,027	0,022	-0,002	0,014	0,014	-0,006	0,014
KOST-МИТ	-0,004	0,003	0,006	0,008	0,007	-0,007	0,021	0,022	0,029
LOBN-МИТ	0,002	0,030	0,040	0,010	0,007	0,003	0,018	0,040	0,028
NNV-МИТ	-0,001	0,010	0,020	0,004	0,015	0,000	0,010	0,031	0,028
MSK-KOST	0,022	0,023	0,020	0,018	-0,003	0,025	0,011	-0,012	0,014
MSK-LOBN	-0,005	0,004	-0,010	0,013	0,003	0,014	0,025	0,002	0,012
MSK-NNV	0,041	0,046	0,050	0,018	-0,014	0,018	0,016	-0,010	0,048
KOST-LOBN	-0,032	0,018	0,017	0,000	0,007	-0,002	0,023	0,024	0,016
KOST-NNV	-0,013	0,029	0,012	0,007	-0,005	0,002	0,014	0,010	0,037
LOBN-NNV	0,038	0,052	0,072	0,011	0,000	0,008	0,012	0,032	0,036

Таблица 5

Сравнение минимальных разностей приращений координат при продолжительности измерений 1 час

Линия	Статика – КРЕДО			PPP-RTX			PPP-CRSR		
	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м
MSK-МИТ	0,016	-0,004	-0,035	0,004	-0,022	-0,015	0,004	-0,022	-0,002
KOST-МИТ	-0,042	0,015	0,004	-0,008	-0,015	-0,040	0,000	-0,005	-0,010
LOBN-МИТ	0,033	0,035	-0,042	-0,009	-0,019	-0,033	-0,013	-0,021	0,008
NNV-МИТ	-0,058	0,009	0,007	-0,011	-0,004	-0,037	-0,002	0,008	0,017
MSK-KOST	0,027	-0,032	-0,022	0,002	-0,009	0,015	0,001	-0,019	0,003
MSK-LOBN	-0,005	-0,036	-0,016	0,000	-0,012	0,005	-0,001	-0,029	-0,043
MSK-NNV	0,006	-0,019	-0,017	0,006	-0,024	0,004	-0,013	-0,039	-0,041
KOST-LOBN	-0,037	-0,010	-0,009	-0,011	-0,004	-0,021	-0,008	-0,020	-0,057
KOST-NNV	-0,008	-0,036	-0,031	-0,005	-0,016	-0,021	-0,017	-0,028	-0,054
LOBN-NNV	-0,076	0,016	0,003	-0,003	-0,022	-0,012	-0,031	-0,034	-0,016

Таблица 6

Сравнение минимальных разностей приращений координат при продолжительности измерений 2 часа

Линия	Статика – КРЕДО			PPP-RTX			PPP-CRSR		
	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м	$\delta X$ , м	$\delta Y$ , м	$\delta Z$ , м
MSK-МИТ	0,018	-0,001	-0,032	0,005	-0,012	-0,005	0,005	-0,011	-0,016
KOST-МИТ	-0,033	-0,022	-0,012	-0,003	-0,001	-0,023	-0,004	0,005	-0,011
LOBN-МИТ	-0,003	-0,022	0,007	0,002	-0,006	-0,016	-0,013	-0,011	-0,018
NNV-МИТ	-0,057	-0,022	-0,051	-0,009	0,004	-0,015	-0,005	0,004	-0,038
MSK-KOST	0,008	-0,027	-0,003	0,004	-0,012	0,012	-0,009	-0,030	-0,025
MSK-LOBN	-0,012	0,001	-0,013	0,001	-0,016	0,006	-0,009	-0,048	-0,025
MSK-NNV	0,034	0,042	0,036	0,010	-0,021	0,005	-0,001	-0,040	-0,015
KOST-LOBN	-0,033	0,015	0,013	-0,007	-0,005	-0,013	-0,005	-0,030	-0,012
KOST-NNV	-0,015	-0,016	-0,039	-0,003	-0,012	-0,013	0,001	-0,018	-0,010
LOBN-NNV	-0,074	0,049	0,043	0,004	-0,017	-0,006	-0,009	-0,024	-0,017

При трех часах были получены практически такие же результаты, что и при двух часах. Наибольшие разности составили 5 мм; наименьшие – 3 мм.

При двух часах были выявлены максимальные разности. В сравнении двух- и трехчасовых данных отличаются в среднем на 2–3 мм

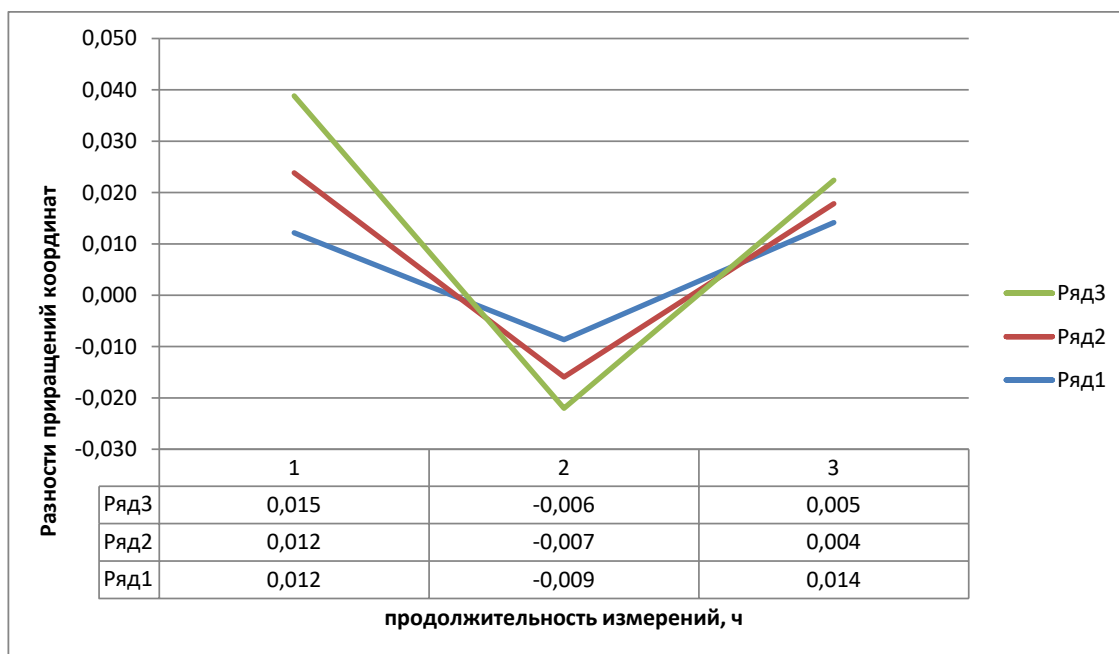
Отклонение минимальных разностей по модулю составило в среднем 2–3 мм для минимальных разностей приращений координат в сравнении с трехчасовыми измерениями.

Анализируя табл. 1–6, можно заметить, что приращения координат в среднем отличаются на 2–3 мм при сравнении двух- и трехчасовых измерений соответственно. При этом стоит отметить, что  $\rho_{\text{доп}}$  в сред-

нем составил  $1.54 \pm 0,03$ . Количество принимаемых спутников при одном часе в среднем составило 18; при двух часах – 24, при трех часах – 27.

На основании табл. 1–6 был построен график (рис. 3), иллюстрирующий влияние продолжительности измерений на получаемые результаты.

В работе [10] отмечено, что при продолжительности измерений 1 час расхождения достигают 3 см при расстоянии в 50 км; при продолжительности 2 часа не более 7 мм по  $\delta Z$ ; 3 и 4 ч – расхождения между приращениями координат не превышали 2 мм. В работе [11] было рассмотрено применение PPP-методов для решения задач геодинамики, где было отмечено, что относительный метод проигрывает в плане точности PPP-методам.



*Рис. 3. Распределение разностей приращения*

### Выводы

1. Точность взаимного положения пунктов, определенных PPP-методами, не зависит от расстояний между пунктами.

2. По PPP-алгоритму возможно обрабатывать и 10-минутные измерения. Однако для получения уточненного решения продолжительность измерений должна составлять не менее 2 ч. При продолжительности измерений 3 ч и более точность взаимного положения пунктов практически не меняется.

3. При многократных измерениях получается примерно одинаковая точность как взаимного положения пунктов, так и однозначного положения пунктов при наличии эталонных координат

### Список литературы

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. Монография / ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.: ил.
2. Антонович К.М., Липатников Л.А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (Precise Points Positioning) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 4. С. 44–47.

3. Alkan R.M., Ocalan T. Usability of the GPS Precise Point Positioning Technique in Marine Applications. The Journal of Navigation. 2013. Vol. 66. P. 579–588.

4. EFT COORS – сети базовых станций // EFT COORS. [Электронный ресурс]. URL: <https://eft-cors.ru/about-us> (дата обращения: 20.02.2022).

5. Kouba J. A guide to using International GNSS Service (IGS) products. 2015. 34 с.

6. Виноградов А.В., Войтенко А.В., Жигулин А.Ю. Оценка точности метода PRECISE POINT POSITIONING и возможности его применения при кадастровых работах // Геопрофи. 2010. № 2. С. 27–30.

7. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1999. 272 с.

8. Макаров С.О. Исследование точности определения координат PPP-алгоритмом и другими современными способами обработки данных: магистерская диссертация. Москва: Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), 2021. 102 с.

9. Тихонов А.Д., Макаров С.О. Применение алгоритма обработки спутниковых данных для создания геодезических сетей протяженных объектов / Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. М.: Белорусско-Российский университет, 2021. С. 370–371.

10. Тихонов А.Д., Макаров С.О. Анализ точности координат геодезических пунктов, определённых с помощью PPP сервисов // Качество. Инновации. Образование. 2021. № 3. С. 71–83.

11. Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринев В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И., Мельников А.Ю. Численное моделирование напряженно-деформационного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 (г. Напа, шт. Калифорния, США) // Геотектоника. 2018. № 4. С. 90–102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069.