

## СТАТЬЯ

УДК 528.02

**АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПУНКТОВ,  
ОПРЕДЕЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДИКИ  
ВЫСОКОТОЧНЫХ КООРДИНАТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ  
ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ**<sup>1,2</sup>Макаров С.О., <sup>2</sup>Тихонов А.Д.<sup>1</sup>Российский университет транспорта, Москва, e-mail: makstas96@ya.ru;<sup>2</sup>Государственный университет по землеустройству, Москва

В статье рассматривается возможность применения Precise Point Positioning (PPP) – алгоритма для определения приращений координат в диапазоне расстояний 26-70 км, путем сравнения разностей приращений координат между эталонными приращениями и уравниваемыми данными, полученных при уравнивании данных в статике и по PPP-методам. Кроме этого, нами поставлен ряд задач: провести исследование точности координат, полученных по PPP-алгоритму и в сравнении со статикой; сравнить данные при уравнивании. Для обработки по PPP-алгоритму реализованы программное обеспечение и интернет-сервисы. В среднем разности приращений координат на базовых пунктах, входящих в состав сети EFT COORS, при 1-3 часах измерений не превышает 6 мм по всем осям. Основные выводы по статье заключаются в том, что PPP-алгоритм можно использовать для передачи координат в различных диапазонах расстояний; для получения фиксированного решения необходимо измерять не менее 2 часов. Научная новизна работы заключается в том, что было рассмотрено применение PPP-алгоритма в узком диапазоне расстояний; а также выполнено сравнение уравниваемых приращений координат, полученных в результате обработки по PPP-алгоритму и статике.

**Ключевые слова:** геодезические спутниковые сети, уравнивание статических данных, точность определения координат, методы высокоточных координатных определений (PPP)

**ANALYSIS OF THE ACCURACY OF THE COORDINATES OF GEODETIC  
POINTS DETERMINED USING THE METHOD OF HIGH-PRECISION  
COORDINATE DEFINITIONS OF SATELLITE DATA PROCESSING**<sup>1,2</sup>Makarov S.O., <sup>2</sup>Tikhonov A.D.<sup>1</sup>Russian University of Transport, Moscow, e-mail: makstas96@ya.ru;<sup>2</sup>State University for Land Management, Moscow

The article discusses the possibility of using Precise Point Positioning (PPP), an algorithm for determining coordinate increments in the distance range of 26-70 km, by comparing the differences in coordinate increments between reference increments and equalized data obtained in statics and by PPP methods. In addition, we have set a number of tasks: to conduct a study of the accuracy of the coordinates obtained by the PPP algorithm and in comparison with statics; to compare the data when equalizing. Software and Internet services are implemented for processing according to the PPP algorithm. On average, the difference in coordinate increments at the base points that are part of the EFT COORS network at 1-3 hours of measurements does not exceed 6 mm along all axes. The main conclusions of the article are that the PPP algorithm can be used to transmit coordinates in various ranges of distances; to obtain a fixed solution, it is necessary to measure at least 2 hours; The scientific novelty of the work is that the application of the PPP algorithm in a narrow range of distances was considered; and a comparison of the equalized increments was performed coordinates obtained as a result of processing by the PPP algorithm and statics.

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

На сегодняшний день существуют различные методы спутникового позиционирования. Одним из перспективных является метод высокоточных координатных определений, или по-другому Precise Point Positioning (далее – PPP). Одной из проблем, ограничивающих его использование, является отсутствие рекомендаций по выполнению обработки по PPP-алгоритму с точки зрения продолжительности и количества принимаемых спутников [1]. В международном научном сообществе отсутствует регламентирующая документация по использованию данного метода. Помимо это-

го, в российском научном сообществе отсутствует точно выраженное определение PPP. Эти проблемы были подробно рассмотрены в работе [2].

На сегодняшний день обработка возможна по трем подходам: с использованием научного ПО, коммерческого ПО и интернет-сервисов [3; 4]. К первой группе относятся такие программные обеспечения, как Bernese, Grafnet. Ко второй группе можно отнести: Trimble Business Centre (далее – TBC), «КРЕДО ГНСС». Третья группа представлена интернет-сервисами: Trimble-RTX, CRSR, APPS, magicgnss, Auspos [5; 6].

В отличие от классических относительных методов, PPP-алгоритм не требует наличия базовых станций и реализуется благодаря использованию высокоточных данных, таких как высокоточные эфемериды, поправки к времени бортовых часов навигационных спутников, атмосферных поправок в пределах локальной области, влиянию приливных поправок смещения станции, вызванных солнечным и лунным притяжением; исключение затмений [7-8].

Цели исследования:

1. Выявить зависимость продолжительности измерений на точность получения координат в случае обработки по PPP-алгоритму.
2. Оценить влияние факторов, влияющих на точность определения координат при PPP-алгоритме (косвенно оценить количество спутников; продолжительность измерений; расстояния между пунктами).
3. Исследовать точность получения координат при уравнивании данных по PPP-алгоритму и статике.

#### Материалы и методы исследования

Для решения основных задач исследования была сформирована спутниковая сеть, состоящая из 5 пунктов. RINEX-файлы, как и эталонные координаты пунктов (LOBN, ODIN, ZHDR, HGNK), были получены из сети базовых станций EFT COORS [9; 10]. Данные по 5 пункту были получены самостоятельно. В качестве исходного (опорного) пункта был выбран пункт МИИТ. На рисунке 1 представлена данная сеть.

В дальнейшем происходила камеральная обработка сети с использованием

PPP-алгоритма. Для обработки по PPP-алгоритму были применены интернет-сервисы Trimble RTX и CRSR. Для контроля данных, получаемых в ходе обработки с использованием интернет-сервисов, была также выполнена и обработка в статике с использованием программного обеспечения «КРЕДО ГНСС» версии 2.0.

В дальнейшем в статике была выполнена обработка базовых векторов с использованием высокоточных эфемерид, т.е. были получены «обработанные» приращения координат между пунктами. В случае обработки по PPP-алгоритму приращения координат были вычислены вручную с использованием ПО Microsoft Excel.

После получения приращений координат с использованием PPP-алгоритма и статике было выполнено уравнивание данной сети. Уравнение поправок в этом случае будет выглядеть стандартным образом по формуле [11]:

$$AD + L = V,$$

где D – вектор оценок искомых неизвестных (поправки к координатам);

A – матрица коэффициентов параметрического уравнивания;

L – вектор невязок, между приращениями координат.

Результаты обработки в статике приведены в таблице 1.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В таблицах 1-3 приводятся разности приращений координат после уравнивания.

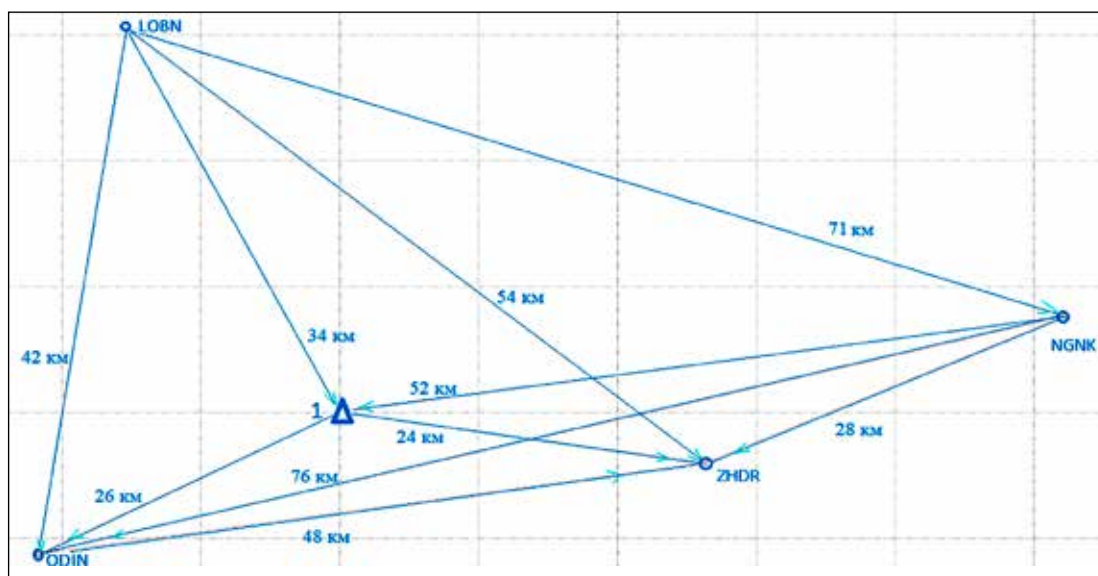


Рис. 1. Схема спутниковой сети

Таблица 1

Разности приращений координат после уравнивания при 1 часе

Линия	Уравнивание в статике			Уравнивание PPP-RTX			Уравнивание PPP-CRSR		
	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$
LOBN-NGNK	-0,050	-0,007	-0,012	0,014	0,001	-0,005	0,007	-0,006	-0,018
LOBN-ODIN	-0,085	-0,010	-0,020	0,018	0,007	0,015	0,018	0,008	0,014
LOBN-ZHDR	-0,012	0,024	0,016	-0,010	-0,001	-0,002	-0,003	0,004	0,001
LOBN-1	0,061	0,008	0,107	0,061	-0,015	0,170	-0,062	-0,047	-0,002
NGNK-ODIN	0,056	0,077	0,028	0,004	0,006	0,020	0,011	0,014	0,032
NGNK-ZHDR	0,065	-0,023	0,020	-0,024	-0,002	0,002	-0,010	0,011	0,018
NGNK-1	0,080	0,061	0,109	0,047	-0,016	0,175	-0,069	-0,041	0,016
ODIN-ZHDR	0,074	0,034	0,036	-0,028	-0,008	-0,017	-0,021	-0,003	-0,013
1-ODIN	-0,124	-0,064	-0,017	-0,043	0,022	-0,155	0,080	0,055	0,016
1-ZHDR	-0,050	-0,030	-0,081	-0,071	0,014	-0,172	0,059	0,052	0,003

Таблица 2

Разности приращений координат после уравнивания при 2 часах

Линия	Уравнивание в статике			Уравнивание PPP-RTX			Уравнивание PPP-CRSR		
	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$
LOBN-NGNK	0,022	-0,046	0,032	0,023	0,008	0,001	0,022	0,009	0,000
LOBN-ODIN	-0,063	-0,040	-0,039	0,022	0,013	0,022	0,023	0,013	0,022
LOBN-ZHDR	0,040	-0,020	0,036	0,001	0,008	0,011	-0,006	0,005	0,001
LOBN-1	0,070	0,029	0,109	0,027	-0,035	0,114	-0,101	-0,090	-0,118
NGNK-ODIN	-0,036	0,049	-0,030	-0,001	0,005	0,021	0,001	0,004	0,022
NGNK-ZHDR	0,001	0,016	-0,003	-0,022	0,001	0,009	-0,028	-0,003	0,000
NGNK-1	0,051	0,082	0,070	0,004	-0,043	0,113	-0,123	-0,099	-0,118
ODIN-ZHDR	0,103	0,021	0,075	-0,021	-0,004	-0,011	-0,029	-0,007	-0,021
1-ODIN	-0,136	-0,077	-0,141	-0,005	0,048	-0,092	0,124	0,103	0,140
1-ZHDR	-0,032	-0,056	-0,066	-0,026	0,044	-0,103	0,095	0,096	0,119

Таблица 3

Разности приращений координат после уравнивания при 3 часах

Линия	Уравнивание в статике			Уравнивание PPP-RTX			Уравнивание PPP-CRSR		
	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$	$\delta X_{,м}$	$\delta Y_{,м}$	$\delta Z_{,м}$
LOBN-NGNK	0,021	-0,041	0,032	0,016	0,005	-0,003	0,018	0,006	0,002
LOBN-ODIN	-0,048	-0,032	-0,010	0,019	0,009	0,020	0,019	0,010	0,020
LOBN-ZHDR	0,022	-0,021	0,029	-0,007	0,002	0,002	-0,005	0,004	0,006
LOBN-1	0,073	0,035	0,109	0,014	-0,067	0,103	-0,103	-0,092	-0,139
NGNK-ODIN	-0,039	0,042	-0,017	0,003	0,004	0,023	0,001	0,004	0,019
NGNK-ZHDR	0,002	0,004	-0,004	-0,023	-0,002	0,004	-0,023	-0,001	0,004
NGNK-1	0,050	0,085	0,072	-0,002	-0,072	0,106	-0,121	-0,098	-0,140
ODIN-ZHDR	0,069	0,011	0,038	-0,026	-0,006	-0,018	-0,024	-0,005	-0,014
1-ODIN	-0,118	-0,076	-0,114	0,005	0,076	-0,083	0,122	0,102	0,159
1-ZHDR	-0,049	-0,065	-0,076	-0,021	0,070	-0,101	0,098	0,097	0,145

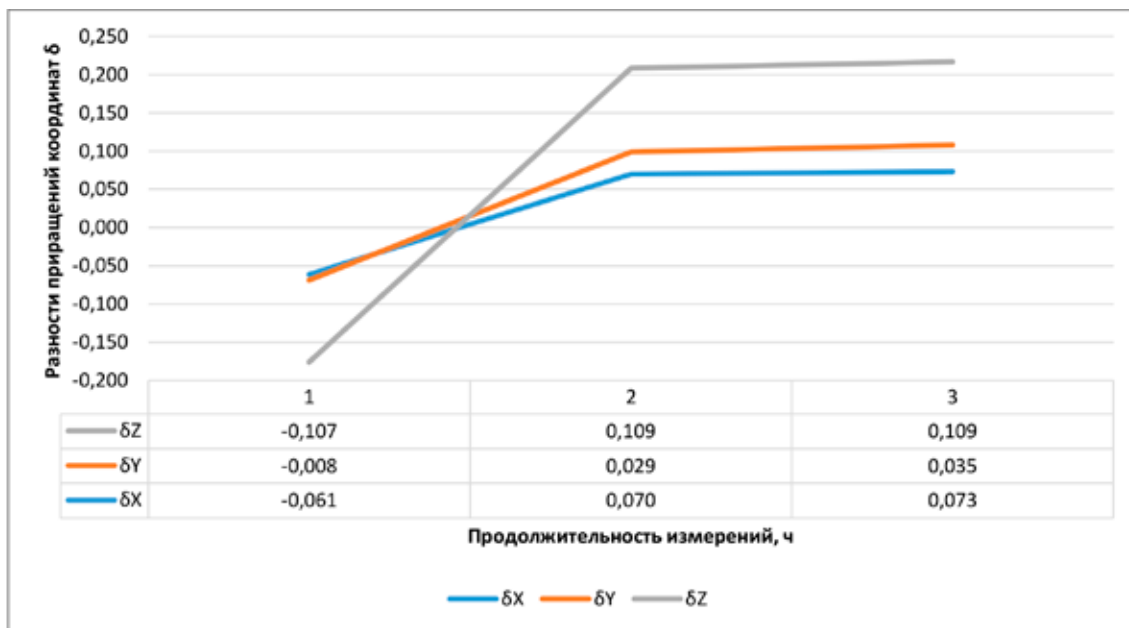


Рис. 2. Влияние продолжительности измерений на получаемые результаты при уравнивании статических данных

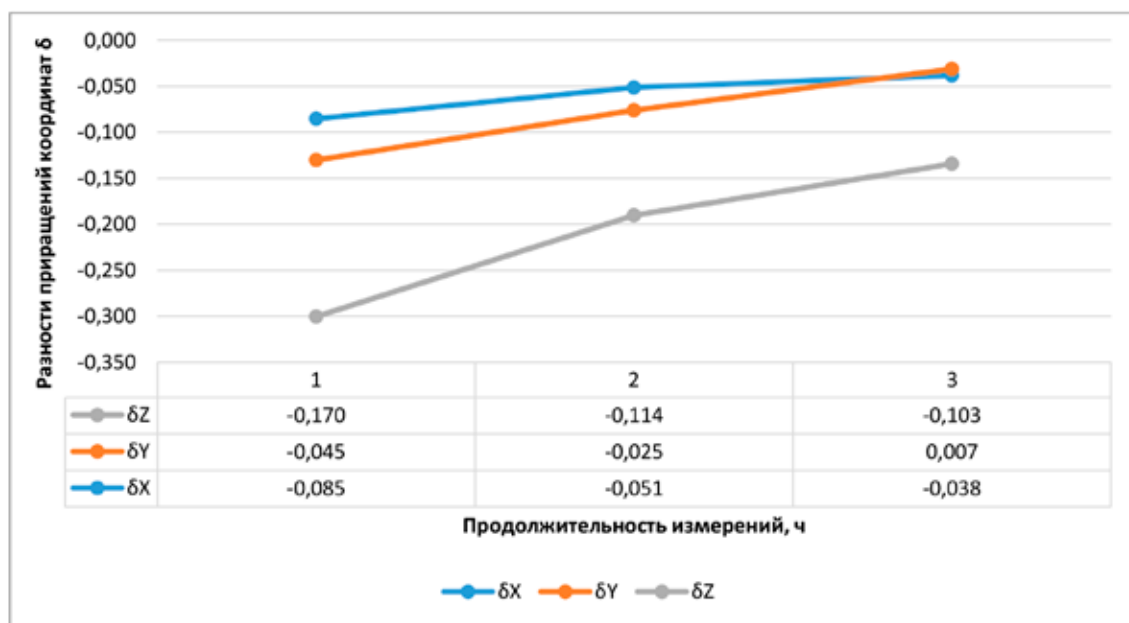


Рис. 3. Влияние продолжительности измерений на получаемые результаты при уравнивании RTX-данных

При сравнении таблиц 1-3 можно заметить, что разности приращений координат в сравнении RTX и CRSR отличаются на небольшие величины (1-2 мм в случае, если оба пункта относились к EFT).

На рисунке 2 приведен график, иллюстрирующий влияние продолжительности измере-

ний на получаемые результаты. На рисунках 3, 4 приводятся данные по PPP-алгоритму.

Однако при анализе таблиц 1-3 можно заметить, что разности приращений координат на линиях LOBN-1, NGNK-1, 1-ODIN, 1-ZHDR отличаются на max 12 см по модулю, из-за влияния PDOP-фактора.

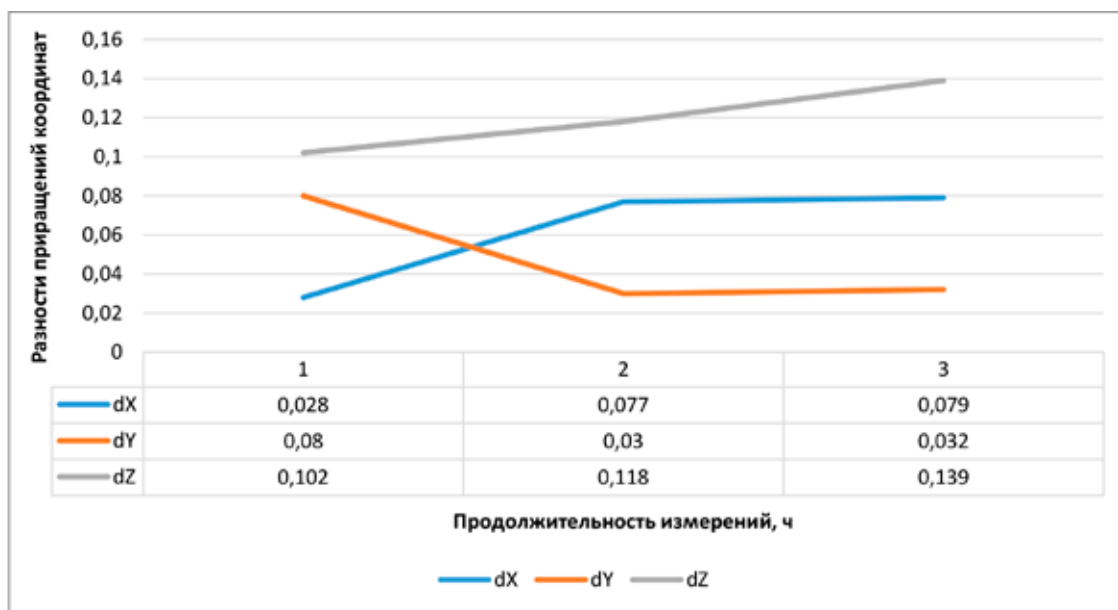


Рис. 4. Влияние продолжительности измерений на получаемые результаты при уравнивании CRSR-данных

DOP (dilution of precision) – термин, характеризующий пространственное положение спутников относительно антенны приемника. В настоящее время существует большое количество DOP-факторов, однако наиболее подходящий PDOP-фактор

PDOP (position DOP) – снижение точности по местоположению. При этом точность PDOP-фактора зависит от таких составляющих, как HDOP (точность в горизонтальной плоскости); VDOP (точность в вертикальной плоскости); средняя величина PDOP-фактора варьировалась от 1.2 и до 1.6 на станциях LOBN, NGNK, ODIN, ZHDR.

В случае станции 1 (МПТ) PDOP-фактор при одном часе составил 1.6\* (20 спутников 6R и 14G); при двух – 1.9\*\* (23 спутника 7R и 13G)); при трех – 1.5\*\*\* (23 спутника 11R и 17G). Ниже приведены некоторые комментарии по изменению PDOP-фактора:

\*с 11:01:18 до 11:02:25 колебался с 3.0 до 7.0, после чего упал до 1.8;

\*\*с 11:19:42 до 11:19:39 1.7, с 11:19:39 по 11:20:48 5.45, до 11:30 5.64, после чего с 11:20:51 не превышал 1.9;

\*\*\* до 11:19:36 PDOP не превышал 1.3, после чего до 11:20:29 варьировался от 1.3 до 4.9, затем подъем до 11:20:38, когда значение PDOP составило 21.8, после чего спуск до 11:20:49 до значения PDOP 1.5.

Считается, в том случае, когда PDOP «2-3» – точность «отличная», когда «4-6» – точность хорошая.

Из данных абзацев сделан вывод о том, что при одинаковом количестве используемых спутников для обработки по PPP-алгоритму величина PDOP-фактора играет ключевую роль, поскольку происходит отягощение результатов наблюдений.

В работах [12; 13] рассматривается возможность применения PPP-алгоритма для решения таких задач, как решение геодезических задач, с целью возможного контроля за сейсмически активными регионами с целью прогнозирования возможных землетрясений. В работе [14] рассматривается возможность применения PPP-алгоритма спутниковых данных для решения геодезических задач, в части построения геодезических сетей.

### Выводы

В ходе анализа выполненных работ получены следующие основные выводы.

1. В диапазоне расстояний (24-76 км) точность взаимного определения координат геодезических пунктов примерно сопоставима между собой.

2. Точность определения координат практически неизменна свыше 2 часов (таблицы 1-3).

3. Колебания PDOP-фактора оказывают большое влияние (практически в 5 раз) на получаемые результаты как в статике, так и по PPP-алгоритму.

4. Точность уравнивания по PPP-алгоритму несколько выше, чем при уравнивании данных, полученных в статике.

### Список литературы

1. Abou-Galala M., Rabah M., Kaloop M., Zidana Z.M. Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning. Alexandria Engineering Journal. 2017. DOI: 10.1016/j.aej.2017.04.019.
2. Alkan R.M., Ocalan T. Usability of the GPS Precise Point Positioning Technique in Marine Applications. The Journal of Navigation. 2013. V. 66. P. 579-588.
3. Ebner R., Featherstone W.E. How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks? Journal of Applied Geodesy. 2008. V. 2(3). P. 149–157. DOI 10.1515/JAG.2008.017.
4. 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. № 54. С. 44-47.
5. 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.
6. Войтенко А.А. О реализации и оценке точности методики «Precise Point Positioning» (PPP) // Геодезия и картография. 2017. № 9. С. 42-49. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-927-9-42-49.
7. Войтенко А.В., Быков В.Л. Методика точного дифференциального позиционирования: краткий обзор // Геодезия и картография. 2016. № 8. С. 26–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-914-8-26-30.
8. Макаров С.О. Исследование точности определения координат PPP-алгоритмом и другими современными способами обработки данных: магистерская диссертация / Российский Университет Транспорта РУТ(МИИТ). М., 2021. 102 с.
9. Макаров С.О., Тихонов А.Д. Сравнение точности геодезических сетей, координаты которых определены с использованием метода высокоточных координатных определений и классической постобработкой // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 103-108.
10. EFT COORS – сети базовых станций. [Электронный ресурс]. URL: <https://eft-cors.ru/about-us> (дата обращения: 20.12.2022).
11. Коробочкин М.И., Тихонов А.Д. Уравнивание геодезических сетей с помощью аппаратуры СРНС, методами математического программирования // Землеустройство. кадастр и мониторинг земель. 2016. № 5. С. 78-86.
12. Мельников А.Ю. Разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений: дис ... канд. тех. наук. Москва, 2019. 152 с.
13. Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринов 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.
14. Тихонов А.Д., Макаров С.О. Анализ точности координат геодезических пунктов, определённых с помощью PPP сервисов // Качество. Инновации. Образование. 2021. №3. С. 71-83.