

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.41

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-19-26>

**Применение усовершенствованной методики создания геодезических сетей с использованием метода PPP при построении ВГС**

С. О. Макаров <sup>1</sup>✉, А. Д. Тихонов <sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству,  
г. Москва, Российская Федерация

e-mail: makstas96@ya.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные способы обработки данных с использованием метода PPP, а также приведены сведения по построению геодезических сетей с использованием относительного метода ГНСС-измерений. Основной акцент сфокусирован на совершенствовании методики построения геодезических сетей с использованием современных методов спутниковых координатных определений. В качестве экспериментального объекта выбрана геодезическая сеть, состоящая из четырёх пунктов, образующих геодезический четырёхугольник. Пункты сети расположены на взаимном удалении от 88 до 300 км, что соответствует нормативным требованиям к структуре высокоточной геодезической сети. В работе приводятся сравнительные результаты оценки точности определения координат. Для сопоставления были использованы данные, полученные с помощью относительного метода (продолжительность сеансов — 72 часа) и метода PPP. Обработка данных по методу PPP выполнялась с использованием интернет-сервисов CSRS и webppp. Обработка относительным методом осуществлялась в программных продуктах Trimble Business Centre и «КРЕДО ТИМ» (модуль «КРЕДО ГНСС»). Оценка точности координат, определенных относительным методом, составила  $m_{Xcp} = 0,024$  м,  $m_{Ycp} = 0,020$  м,  $m_{Zcp} = 0,014$  м, а методом PPP  $m_{Xcp} = 0,005$  м,  $m_{Ycp} = 0,006$  м,  $m_{Zcp} = 0,004$  м, соответственно. Полученные данные свидетельствуют о том, что применение метода PPP позволяет достичь высокой точности за существенно меньшее время, что подтверждает перспективность его использования для решения прикладных геодезических задач.

**Ключевые слова:** геодезические сети, методика создания геодезических сетей, относительный метод, метод PPP, высокоточная геодезическая сеть

**Для цитирования:**

Макаров С. О., Тихонов А. Д. Применение усовершенствованной методики создания геодезических сетей с использованием метода PPP при построении ВГС. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 19–26. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-19-26>

**Optimized methodology for establishing high-precision geodetic control networks using precise point positioning**

S. O. Makarov <sup>1</sup> ✉, A. D. Tikhonov <sup>1</sup>

<sup>1</sup> State University for Land Use Planning, Moscow, Russian Federation

e-mail: makstas96@ya.ru

**Abstract.** The paper considers the principal approaches to data processing using the Precise Point Positioning (PPP) method and summarizes the essential aspects of geodetic network establishment based on the relative GNSS measurement technique. Particular attention is devoted to improving the methodology for constructing geodetic networks by means of modern satellite-based coordinate de-

termination methods. The experimental case study involved a geodetic network composed of four points forming a geodetic quadrilateral. The network points are separated by distances ranging from 88 to 300 km, which satisfies the regulatory requirements for the configuration of a high-precision geodetic network. Comparative results of coordinate accuracy assessment are presented in the study. For comparison purposes, data obtained by the relative method with a session duration of 72 hours were compared with results derived from the PPP method. PPP data processing was performed using the CSRS and webppp online services. Relative processing was carried out in Trimble Business Center and CREDO TIM software, specifically within the CREDO GNSS module. The coordinate accuracy achieved by the relative method was  $m_{X_{avg}} = 0.024$  m,  $m_{Y_{avg}} = 0.020$  m, and  $m_{Z_{avg}} = 0.014$  m, whereas the PPP method yielded  $m_{X_{avg}} = 0.005$  m,  $m_{Y_{avg}} = 0.006$  m, and  $m_{Z_{avg}} = 0.004$  m. The results obtained indicate that the PPP method makes it possible to achieve high coordinate accuracy in substantially less time, thereby confirming its applicability for practical geodetic tasks.

**Keywords:** geodetic networks, network establishment methodology, PPP method, high-precision geodetic control networks

#### For citation:

Makarov S. O., Tikhonov A. D. (2026). Optimized methodology for establishing high-precision geodetic control networks using precise point positioning. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 19–26. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-31-4-19-26>

#### Введение

В последние десятилетия методы спутниковых координатных определений претерпевают значительные изменения. Одним из инновационных методов является метод высокоточных координатных определений – Precise Point Positioning (PPP).

В последние годы продолжается исследование метода PPP для целей геодезии. Можно выделить авторов, занимающихся подобными исследованиями: Н. С. Косарев, В. В. Калинин, В. И. Кафтан, М. Я. Брын, Л. А. Липатников, К. М. Антонович, R. Ebner, W. E. Featherstone, P. Heroux, Kallop M., Kouba J. и др. Изучение факторов, влияющих на точность координатных определений методом PPP, содержится в работах [1–5]. Исследования по созданию геодезических сетей с использованием спутниковой аппаратуры приведены в работах [6–11]. Анализ различных факторов, в целом влияющих на точность определения координат при использовании спутниковых методов, подробно приведен в публикациях [12–15]. Использование ГНСС-аппаратуры для решения геодезических задач описано в статьях [16–18].

Анализ научных трудов и публикаций показал отсутствие сведений об использовании метода PPP для построения геодезических сетей. В связи с этим авторы сочли необходи-

мым разработать усовершенствованную методику создания геодезических сетей.

Целью данной работы является рассмотрение возможности создания геодезических сетей на примере фрагмента высокоточной геодезической сети (ВГС) с использованием метода PPP обработки спутниковых данных.

#### Материалы и методы исследований

В настоящее время высокоточное получение координат пунктов с использованием метода PPP может быть реализовано как с помощью интернет-сервисов, так и с использованием различного программного обеспечения. К интернет-сервисам относятся: Trimble RTX, CSRS, magicPPP, PPPaaS IGN, APPS, WebPPP и PPPaaS [19–21]. Последние два сервиса являются отечественной разработкой, что свидетельствует об интересе к развитию применения метода PPP для решения различных задач на территории РФ. Среди программных обеспечений наиболее популярными программными продуктами и программным обеспечением являются: Trimble Business Centre, КРЕДО ТИМ (модуль КРЕДО ГНСС), Bernese, RTKlib, TropoGNSS [22, 23].

В настоящее время геодезические сети создаются преимущественно относительным методом ГНСС-измерений. Создание геодезических сетей – достаточно длительный и дорогостоящий процесс. Большинство наземных сетей создаются с использованием спутниковых (ГНСС) измерений, которые

проводятся и обрабатываются в соответствии с ГОСТ (ГОСТ Р 57372-2016 Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты высокоточной геодезической сети (ВГС). Технические условия, М., 2016. – С. 3–5). В указанном стандарте описан относительный метод определения координат, который подразумевает вычисление базовой линии между двумя пунктами. Расстояния между пунктами при использовании относительного метода ГНСС-измерений оказывают влияние на точность определения координат.

Между тем наличие в свободном доступе высокоточной эфемеридной и другой высокоточной информации (локальных моделей ионосферы и тропосферы, поправок часов спутников, влияния приливов (твердых и жидких)) для определения координат из

ГНСС-измерений делает возможным применение для этой цели метода PPP.

На наш взгляд, основными преимуществами метода PPP перед относительным методом являются:

- 1) точность определения координат не зависит от расстояний между пунктами;
- 2) меньшая продолжительность сеансов измерений.

Сдерживающими факторами для повсеместного применения данного метода являются недостаточное исследование его точностных возможностей и отсутствие официальных регламентирующих документов. На основании проведенных исследований приводятся существующие (с использованием относительного метода) и предлагаемые требования по созданию геодезических сетей (с использованием метода PPP), приведенные в табл. 1.

**Таблица 1.** Существующие и предлагаемые требования ВГС

| Параметр                              | Существующие требования                                                                                               | Предлагаемые требования                                             |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Режим измерений                       | Статика                                                                                                               | Статика                                                             |
| Метод обработки                       | Статика (относительный метод)                                                                                         | Метод PPP                                                           |
| Расстояния между пунктами сети        | От 100 до 250 км в районах с плотностью населения 35 и более на 1 км <sup>2</sup> и в районах сейсмической активности |                                                                     |
| Количество спутников                  | Не менее 6 (GPS и ГЛОНАСС) одновременно наблюдаемых спутников на каждую базовую линию                                 | Не менее 15 спутников (7 ГЛОНАСС и 8 GPS) на каждом из пунктов сети |
| Дискретность записи                   | 30 секунд                                                                                                             |                                                                     |
| Минимальный угол возвышения           | 10°                                                                                                                   |                                                                     |
| Продолжительность 1 сеанса наблюдений | Не менее трех суток                                                                                                   | 3 часа                                                              |
| Характеристика ГНСС аппаратуры        | Двухчастотное и двухсистемное                                                                                         | Многочастотное и мультисистемное                                    |

Как видно из табл. 1, предлагаемая методика создания геодезических сетей с использованием метода PPP имеет ряд преимуществ в сравнении с утвержденной методикой. Среди преимуществ можно выделить сокращение временных затрат на полевые работы и повышение точности в сравнении с относительным методом.

Предлагаемая методика по созданию геодезических сетей с использованием метода PPP может быть представлена в виде трех блоков.

Блок 1 – планирование сеансов и выполнение измерений включает в себя:

- 1) подготовка к измерениям;

- 2) выполнение измерений – продолжительность измерений 3 часа;

- 3) проверку сырых файлов на соответствие критериям: продолжительность измерений – 3 часа; дискретность – 30 секунд; количество спутников > 15 (7 ГЛОНАСС и 8 GPS); PDOP (Position Dilution of Precision) < 3.0; перерывы между сеансами измерений – 12 часов. Количество сеансов – 3.

Блок 2 состоит из нескольких пунктов и включает в себя следующие этапы:

- 1) обработку RINEX файлов с использованием интернет-сервисов. На этапе обработки следует обращать на то, чтобы было использовано не менее 15 спутников различных

систем, из которых семь спутников ГЛОНАСС и восемь GPS.

2) обработку *RINEX* файлов с целью контроля получаемой точности. Рекомендуется выполнять обработку с использованием программного обеспечения/интернет-сервиса с целью сопоставления результатов, полученных в пункте 1.

Блок 3. Уравнительные вычисления и оценка точности полученных данных.

Уравнивание геодезических сетей происходит посредством использования метода наименьших квадратов (МНК). Оценку точности можно выполнять по условиям фигур, что обеспечивает контроль точности по внутренней сходимости. Основное правило заключается в том, что сумма приращений координат (невязка) по замкнутому контуру должна быть равна нулю. Второй способ – по разностям двойных измерений. Разность между ними не должна превышать нормативно допустимую величину. При построении сети ВГС необходимы контрольные измерения не менее трёх раз.

Для апробации методики на практике была рассмотрена геодезическая сеть, состоящая из четырёх пунктов, образующих геодезический четырёхугольник. Как известно, геодезический четырёхугольник является достаточно жёсткой с точки зрения геометрии фигурой и позволяет весьма надёжно оценить точность измерений по невязкам замкнутых фигур.

Для проведения эксперимента были выбраны необработанные файлы формата *RINEX* с пунктов сети базовых станций EFT CORS. На рис. 1 приведена схема сети, пункты которой расположены на удалении друг от друга от 88 до 300 км.

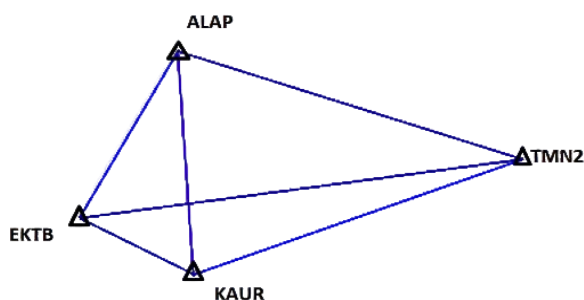


Рис. 1. Схема сети, выбранной для апробации методики

Практическая апробация разработанной методики была осуществлена в два этапа.

1 этап: обработка сеансов спутниковых измерений продолжительностью 72 часа в программном обеспечении КРЕДО ТИМ (модуль КРЕДО ГНСС) и в программном обеспечении *Trimble Business Centre* (TBC).

2 этап: обработка сеансов спутниковых измерений, продолжительностью 3 часа с использованием интернет-сервисов *Trimble RTX* и *CSRS*.

Для обеспечения независимости измерений векторы должны быть определены в разные сеансы измерений. Сеанс 1 *EKTБ-ALAP* (136 км) и *KAUR-TMN2* (236 км); Сеанс 2 *EKTБ-KAUR* (88 км) и *ALAP-TMN2* (240 км); Сеанс 3 *EKTБ-TMN2* (300 км) и *ALAP-KAUR* (161 км). *RINEX* файлы были обработаны в программных обеспечениях КРЕДО ТИМ (КРЕДО ГНСС) и в TBC. Впоследствии были сформированы фигуры, в табл. 2 приводятся результаты оценки точности по внутренней сходимости.

Таблица 2. Оценка точности координат, относительный метод ГНСС

| Фигуры                | Сумма приращений координат |              |        |
|-----------------------|----------------------------|--------------|--------|
|                       | Приращение координат       | КРЕДО ТИМ, м | TBC, м |
| <i>EKTБ-ALAP-TMN2</i> | $\Sigma dX$                | 0,055        | 0,048  |
|                       | $\Sigma dY$                |              |        |
|                       | $\Sigma dZ$                | -0,001       | 0,000  |
| <i>EKTБ-KAUR-TMN2</i> | $\Sigma dX$                | 0,022        | 0,018  |
|                       | $\Sigma dY$                |              |        |
|                       | $\Sigma dZ$                | 0,021        | 0,017  |
| <i>EKTБ-ALAP-KAUR</i> | $\Sigma dX$                | 0,029        | 0,027  |
|                       | $\Sigma dY$                |              |        |
|                       | $\Sigma dZ$                | 0,029        | 0,018  |
| <i>ALAP-TMN2-KAUR</i> | $\Sigma dX$                | -0,034       | -0,026 |
|                       | $\Sigma dY$                |              |        |
|                       | $\Sigma dZ$                | 0,029        | 0,018  |
| <i>ALAP-TMN2-KAUR</i> | $\Sigma dX$                | 0,004        | 0,003  |
|                       | $\Sigma dY$                |              |        |
|                       | $\Sigma dZ$                | 0,002        | -0,004 |
| <i>ALAP-TMN2-KAUR</i> | $\Sigma dX$                | 0,002        | -0,003 |
|                       | $\Sigma dY$                |              |        |
|                       | $\Sigma dZ$                | 0,002        | -0,003 |

В табл. 2 приняты следующие обозначения:  $\Sigma dX$  – сумма приращений координат (невязка по замкнутому контуру) по координате  $X$ ;  $\Sigma dY$  – сумма приращений координат (невязка по замкнутому контуру) по координате  $Y$ ;

$\Sigma dZ$  – сумма приращений координат (невязка по замкнутому контуру) по координате  $Z$ .

Как видно из табл. 2, результаты оценки точности при использовании КРЕДО ГНСС и ТВС практически сопоставимы между собой. Согласно приказу Росреестра от 19.09.2022 П/0344 (ред. от 27.01.2025) «Об установлении структуры государственной геодезической сети и требований к созданию государственной геодезической сети, включая требования к геодезическим пунктам», точность взаимного положения в плане не должна превышать  $3 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-8} \cdot D$ , а по высоте  $5 \text{ мм} + 7 \cdot 10^{-8} \cdot D$ , где  $D$  – расстояние, выраженное в мм. Приведённые в табл. 2 значения соответствуют утверждённым требованиям.

Следует также отметить, что приращения координат были получены в системе координат ITRF 2014. Дальнейшие расчёты также выполнены в этой системе координат, чтобы избежать ошибок при переводе из одной системы координат в другую.

Второй этап исследования заключается в обработке трёхчасовых RINEX-файлов с использованием метода PPP. На основании приращений координат были сформированы четыре фигуры: ЕКТВ – АЛАР – ТУМН (фигура 1); ЕКТВ – КАУР – ТУМН (фигура 2); ЕКТВ – АЛАР – КАУР (фигура 3); АЛАР – ТУМН – КАУР (фигура 4). В табл. 3 приводятся значения сумм приращений координат (невязок) в каждом из трёх сеансов измерений, а также их средние значения.

**Таблица 3.** Оценка точности при использовании PPP метода

| № фигуры | $\Sigma dX$<br>$\Sigma dY$<br>$\Sigma dZ$ | Сеанс 1 |           | Сеанс 2 |           | Сеанс 3 |           | Ср значения |           |
|----------|-------------------------------------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|-----------|
|          |                                           | CSRS, м | webPPP, м | CSRS, м | webPPP, м | CSRS, м | webPPP, м | CSRS, м     | webPPP, м |
| 1        | $\Sigma dX$                               | 0,006   | 0,006     | 0,004   | 0,008     | 0,003   | 0,005     | 0,004       | 0,006     |
|          | $\Sigma dY$                               | 0,009   | 0,007     | 0,008   | 0,004     | 0,010   | 0,008     | 0,009       | 0,006     |
|          | $\Sigma dZ$                               | -0,003  | 0,001     | -0,001  | 0,003     | 0,001   | 0,002     | -0,001      | 0,002     |
| 2        | $\Sigma dX$                               | 0,004   | 0,004     | 0,001   | 0,004     | -0,001  | 0,004     | 0,001       | 0,004     |
|          | $\Sigma dY$                               | -0,007  | -0,005    | -0,008  | -0,005    | -0,011  | -0,002    | -0,009      | -0,004    |
|          | $\Sigma dZ$                               | -0,001  | -0,007    | -0,004  | -0,008    | -0,005  | -0,006    | -0,003      | -0,006    |
| 3        | $\Sigma dX$                               | 0,003   | 0,007     | 0,005   | 0,007     | 0,004   | 0,006     | 0,004       | 0,007     |
|          | $\Sigma dY$                               | 0,003   | 0,002     | 0,007   | 0,004     | 0,006   | 0,003     | 0,005       | 0,003     |
|          | $\Sigma dZ$                               | 0,001   | 0,006     | 0,005   | 0,007     | 0,004   | 0,006     | 0,003       | 0,006     |
| 4        | $\Sigma dX$                               | -0,004  | -0,004    | -0,001  | -0,002    | 0,001   | 0,002     | -0,001      | 0,001     |
|          | $\Sigma dY$                               | 0,016   | 0,010     | 0,011   | 0,011     | 0,012   | 0,009     | 0,013       | 0,010     |
|          | $\Sigma dZ$                               | -0,002  | 0,001     | -0,001  | 0,002     | -0,001  | 0,001     | -0,001      | 0,001     |

### Результаты

При сравнении данных из табл. 2, 3 можно заметить, что при построении геодезических сетей методом PPP необходимая точность достигается всего за три сеанса продолжительностью по три часа, тогда как при создании сети относительным методом требуется несколько сеансов продолжительностью не менее трёх суток.

Оценка точности по разностям двойных измерений, выполненная методом PPP для координат, полученных в системе координат (СК) ГСК-2011, составила:  $m_X = 0,005 \text{ м}$ ,  $m_Y = 0,006 \text{ м}$ ,  $m_Z = 0,004 \text{ м}$ . Для относительного

метода оценка точности составила:  $m_X = 0,024 \text{ м}$ ,  $m_Y = 0,020 \text{ м}$ ,  $m_Z = 0,014 \text{ м}$ .

Конечно, следует отметить, что данная сеть уравнивалась как свободная и при включении в её построение пунктов с твёрдыми координатами реальная точность окажется несколько ниже.

### Обсуждение

Приведенные результаты в работе представляют практическую значимость и обосновывают необходимость совершенствования методики построения геодезических сетей различных классов с использованием метода PPP.

Несмотря на то, что в статье рассмотрено создание геодезической сети на примере ВГС, разработанную методику можно использовать для создания спутниковой геодезической сети 1-го класса при сокращении продолжительности измерений до 2 часов.

### Заключение

При использовании предложенной методики определения координат геодезических пунктов по методу PPP достигается более высокая точность определения координат, чем в нормативной документации. При этом время на выполнение полевых работ сокращается

более чем в 20 раз. Таким образом, как с точки точностной оценки, так и временной, предложенная методика представляется довольно перспективной для практического применения и свидетельствует о необходимости изменения нормативной документации в части пунктов: времени выполнения работ, количества используемых спутников; требований к ГНСС-аппаратуре. Точность определения координат геодезических пунктов в СК ГСК-2011 при использовании относительного метода составила  $m_x = 0,024$  м,  $m_y = 0,020$  м,  $m_z = 0,014$  м, при использовании PPP метода:  $m_x = 0,005$  м,  $m_y = 0,006$  м,  $m_z = 0,004$  м.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ochałek A., Niewiem W., Puniach E., Cwiąkała P. Accuracy evaluation of real-time GNSS precision positioning with RTX Trimble technology. Civil and environmental engineering reports. 2018. Vol. 28 (4). P. 49–61.
2. Karpik A. P., Kosarev N S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Yu. Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurement. Geodesy and Cartography. 2018. Vol. 44. Issue 4. P. 140–145.
3. Тихонов А. Д., Макаров С. О. Применение алгоритма обработки спутниковых данных для создания геодезических сетей протяженных объектов. Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : сб. ст. Могилев : Белорусско-Российский университет, 2021. С. 370–371.
4. Макаров С. О. Исследование точности спутникового позиционирования при использовании современных методов обработки спутниковых данных. Грозненский естественнонаучный бюллетень, 2023. Том 8. № 1 (31). С. 31–38. DOI: 10.25744/genb.2023.15.64.003.
5. 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.
6. Морозов В. Н., Кафтан В. И., Татаринов В. Н., Колесников И. Ю., Маневич А. И., Мельников А. Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 г. (г. Напа, штат Калифорния, США). Геотектоника. 2018. № 4. С. 90–102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069.
7. Мельников А. Ю. Разработка методики анализа деформационных процессов в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений: автореферат диссертации канд. техн. наук. Москва, 2019. 152 с.
8. Бовшин Н. А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011. Геодезия и картография. 2019. № 2. С. 2–14. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
9. Leandro R., Landau H., Nitschke M., Glocker M., Seeger S., Chen X., Deking A., Ben Tahar M., Zhang F., Stolz R., Talbot N., Lu G., Ferguson K., Brandl M., Gomez Pantoja V., Kipka A. RTX Positioning: the Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/>.
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. Wang, G. Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico. Journal of Geodetic Science. 2013. Vol. 3(1). P. 22–31. DOI 10.2478/jogs-2013-0001.
12. Wang, G. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase Measurements. Manuscripta Geodetica. Durango, CO, United States, 1993. Vol. 18. P. 91–98.
13. J. F. Zumberge [et al.] Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research. Durango, CO, United States, 1997. Mar. 10. Vol. 102, (B3). P. 5005–5017. DOI 10.1029/96JB03860.

14. Black, H. D. An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction. *Journal of Geophysical Research*. 1978. Vol. 83, N.B4. P. 1825–1828.
15. GPS-Theory and Practice : Astronomical Institute, University of Bern.– 4th revised edition. Wien : Springer-Verlag, 1997. 389 с.
16. Антонович К. М., Липатников Л. А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (precise point positioning). *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2013. № S4. С. 44–47.
17. Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L. Study on GPS-PPP precision for short observation sessions [Text] / S. Gandolfi, / *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21(3). P. 887–896. DOI 10.1007/s10291-016-0575-4.
18. Montenbruck O. [et al.]. GNSS satellite geometry and attitude models. *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 56(6). P. 1015–1029. DOI 10.1016/j.asr.2015.06.019.
19. Липатников Л. А. Применение методики точного абсолютного позиционирования для высокоточного определения положения геодезических пунктов в общеземной системе координат // *Геодезия и картография*. 2012. № 7. С. 13–16.
20. M. A. d'Alessio [et al.] Slicing up the San Francisco Bay area: Block kinematics and fault slip rates from GPS-derived surface velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2005. June 11. Vol. 110, B6, B06403. P. 1–19. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2004JB003496> (visited on 01/19/2021) ; DOI 10.1029/2004JB003496.
21. Kowalczyk K., Kowalczyk J. Application of PPP Solution to Determine the Absolute Vertical Crustal Movements. Case Study for North eastern Europe, “Environmental Engineering” 10th International Conference). Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2013. 27–28 April 2017, DOI 10.3846/enviro.2017.207.
22. Шевчук С. О., Косарев Н. С., Мелеск А. Х. Исследования точности метода PPP для навигационно-геодезического обеспечения геофизических работ. *Геопрофи*. 2016. № 3. С. 10–15.
23. Косарев Н. С., Борисов Д. М., Малороссиянов С. М. Разработка программного продукта для обработки ГНСС измерений методом PPP: первые результаты. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2025. Т. 12. № 1. С. 78–85.

## REFERENCES

1. Ochalek A., Niewiem W., Puniach E., Ćwiakała P. (2018). Accuracy evaluation of real-time GNSS precision positioning with RTX Trimble technology. *Civil and environmental engineering reports*. Vol. 28 (4). P. 49 – 61
2. Karpik A. P., Kosarev N S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Yu. (2018). Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurement. *Geodesy and Cartography*. Vol. 44. Issue 4. P. 140 – 145.
3. Tikhonov A. D., Makarov S. O. (2021). *Application of the satellite data processing algorithm for creating geodetic networks of extended objects. Materials, equipment and resource-saving technologies : collection of articles [Application of a satellite data processing algorithm for establishing geodetic networks for extended linear objects]*. Mogilev : Belarusian-Russian University, P. 370–371. [in Russian].
4. Makarov S. O. (2023). Research of the accuracy of satellite positioning when using modern methods of processing satellite data. *Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten [Grozny Natural Science Bulletin]*, Vol. 8. No. 1 (31). Pp. 31-38. DOI: 10.25744/genb.2023.15.64.003 [in Russian].
5. Voitenko A. V., Bykov V. L. (2016). The Technique of Precise Differential Positioning: A Brief Overview. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. No. 8. Pp. 26–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-914-8-26-30.
6. V. N. Morozov, V. I. Kaftan, V. N. Tatarinov, I. Yu. Kolesnikov, A. I. Manevich, and A. Yu. Melnikov. (2018). Numerical Modeling of the Stress-Strain State and GPS Monitoring Results of the Epicentral Zone of the August 24, 2014 Earthquake (Napa, California, USA). *Geotectonics [Geotectonics]*. No. 4. Pp. 90–102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069. [in Russian].
7. Melnikov, A. Yu. Development of a methodology for analyzing deformation processes in seismically active regions based on satellite high-precision coordinate determinations: Abstract of the thesis of Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2019. 152 p. [in Russian].
8. Bovshin N. A. (2019). High-Precision GNSS Coordinate Determinations in the GSK-2011 System *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. No. 2. Pp. 2-14. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14 [in Russian].

9. Leandro R., Landau H., Nitschke M., Glocker M., Seeger S., Chen X., Deking A., Ben Tahar M., Zhang F., Stolz R., Talbot N., Lu G., Ferguson K., Brandl M., Gomez Pantoja V., Kipka A. RTX Positioning: the Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning Retrieved from: <https://www.researchgate.net/>
10. Tikhonov A. D., Makarov S. O. (2021). Analysis of the Accuracy of Geodetic Points Coordinates Determined Using RRR Services. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye.. [Quality. Innovations. Education]*. No. 3. Pp. 71–83. [in Russian].
11. Wang, G. (2013). Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico. *Journal of Geodetic Science*. Vol. 3(1). P. 22–31. DOI 10.2478/jogs-2013-0001.
12. Wu J. T. [et al.] (1993). Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase Measurements. *Manuscripta Geodetica*. Durango, CO, United States, Vol. 18. P. 91–98.
13. Zumberge J. F. [et al.] (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*.—Durango, CO, United States, Mar. 10. Vol. 102, (B3). P. 5005–5017. DOI 10.1029/96JB03860.
14. Black, H. D. (1978). An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction. *Journal of Geophysical Research*. 1978. Vol. 83, N.B4. P. 1825–1828.
15. GPS-Theory and Practice : Astronomical Institute, University of Bern.— 4th revised edition. Wien : Springer-Verlag, 1997. 389 c.
16. Antonovich K. M., Lipatnikov L. A. (2013). Improvement of the methodology for precise differential positioning based on GNSS measurements (precise point positioning). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyomka. [Bulletin of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*. No. S4. Pp. 44-47. [in Russian].
17. Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L. (2017). Study on GPS-PPP precision for short observation sessions S. Gandolfi . *GPS Solutions*. Vol. 21(3). P. 887–896. DOI 10.1007/s10291- 016-0575-4.
18. Montenbruck O. [et al.]. (2015). GNSS satellite geometry and attitude models. *Advances in Space Research*. Vol. 56(6). P. 1015–1029. DOI 10.1016/j.asr.2015.06.019. [in Russian].
19. Lipatnikov L. A. (2012). application of the technique of accurate absolute positioning for high-precision determination of the position of geodetic points in the all-zemle coordinate system. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. No. 7. Pp. 13-16.
20. M. A. d'Alessio [et al.] (2005). Slicing up the San Francisco Bay area: Block kinematics and fault slip rates from GPS-derived surface velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. June 11. Vol. 110, B6, B06403.– P. 1–19. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2004JB003496> (visited on 01/19/2021) ; DOI 10.1029/2004JB003496.
21. Kowalczyk, K., Kowalczyk J. (2013). Application of PPP Solution to Determine the Absolute Vertical Crustal Movements. Case Study for North eastern Europe, “Environmental Engineering” 10th International Conference). *Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania*, 2013. 27–28 April 2017, DOI 10.3846/enviro.2017.207. [in Russian].
22. Shevchuk S. O., Kosarev N. S., and Melesk A. Kh. (2016). Research on the Accuracy of the PPP Method for Navigation and Geodetic Support of Geophysical Works. *Geoprofi*. No. 3. Pp. 10 – 15.
23. Kosarev N. S., Borisov D. M., Malorossiyanov S. M. (2025). Development of a Software Product for Processing GNSS Measurements by the RRR Method: First Results. *Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences*. Vol. 12. No. 1. Pp. 78-85.

## Об авторах

Станислав Олегович Макаров – старший преподаватель кафедры «геодезии и геоинформатики» ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству.

Александр Дмитриевич Тихонов – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «геодезии и геоинформатики».

## Author details

Stanislav O. Makarov – Senior Lecturer, Department of Geodesy and Geoinformatics.

Alexander D. Tikhonov – PhD, Associate Professor, Department of Geodesy and Geoinformatics.

Получено / Received 16.03.2026

Поступила после рецензирования / Revised 17.06.2026

Принята к публикации / Accepted 29.06.2026