

СТАТЬИ

УДК 528.2/.3/.5

DOI 10.17513/use.38412

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
НА НЕПРЕРЫВНО ДЕЙСТВУЮЩИХ ОПОРНЫХ
СТАНЦИЯХ GNSS В РЕСПУБЛИКЕ ЛИВАН**^{1,2}Акл М.Н., ¹Половнев О.В., ¹Насереддин Х.Х.¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,
Москва, e-mail: maher.n.akl@gmail.com;²Ливанский международный университет, Бейрут

В статье представлено исследование применения метода точного позиционирования для определения координат базовых станций непрерывного действия в целях обновления геодезической сети и прогнозирования движения земной коры Ливана. В Ливане отсутствуют пункты геодезической сети с постоянно действующей на них спутниковой навигационной аппаратурой, позволяющей обеспечивать пользователей актуальной информацией с достаточной точностью. Для определения движений земной коры и изменений положений пунктов геодезической сети необходимы постоянные наблюдения на станциях глобальной навигационной спутниковой системы с обработкой информации в режиме близком к режиму реального времени, а также с возможностью наращивания точности, близкой к сети первого и второго порядков. Проведен эксперимент для проверки применения метода точного позиционирования. Метод точного позиционирования – это метод спутникового позиционирования, который обеспечивает высокую точность определения координат, посредством получения навигационных поправок от постоянно действующих станций посредством специального сервиса – источника таких поправок. Используя метод точного позиционирования, инженеры-геодезисты могут определять точные географические координаты, повышать общую точность геодезической сети. В исследовании подчеркивается значение точных геодезических координат для непрерывно действующих опорных станций, для модернизации спутниковой геодезической сети, для повышения надежности и эффективности методов съемки, особенно в районах, подверженных сейсмической и геодинамической активности. По итогам исследований сделан вывод, что метод точного позиционирования не полностью удовлетворяет требованиям точности, предъявляемым к базовым станциям, дополнительно необходимо организовать специальный национальный сервис по получению и трансляции специальных навигационных поправок для достижения необходимой точности.

Ключевые слова: геодезическая сеть, глобальная система позиционирования, точное позиционирование, сейсмическая и геодинамическая активность, непрерывно действующие опорные станции

**APPLICATION OF PRECISE POSITIONING METHOD
ON CONTINUOUSLY OPERATING GNSS REFERENCE
STATIONS IN THE REPUBLIC OF LEBANON**^{1,2}Akl M.N., ¹Polovnev O.V., ¹Nasereddin H.H.¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow,
e-mail: maher.n.akl@gmail.com;²Lebanese International University, Beirut

The article presents a study on the application of the Precise Point Positioning method for determining the geographic coordinates of Continuously Operating Reference Stations to update the geodetic network and predict crustal movements in Lebanon. Lebanon is located in a seismically active region, with two major geological faults and several local faults crossing its territory. Constant observations at global position system stations are required to determine crustal movements and changes in the positions of geodetic network points. Precise Point Positioning is a satellite positioning method that provides high accuracy without the need for nearby additional reference stations. Using Precise Point Positioning, survey engineers can determine precise geographic coordinates, thereby improving the overall accuracy of the geodetic network. The study emphasizes the importance of accurate geodetic coordinates for Continuously Operating Reference Stations in modernizing the satellite geodetic network, enhancing the reliability and efficiency of surveying methods, especially in areas prone to seismic and geodynamic activity. The study concludes that the Precise Point Positioning method does not meet the accuracy requirements for reference stations.

Keywords: geodetic network, seismic and geodynamic activity, global navigation satellite system, precise positioning, continuously operating reference stations

Введение

Создание устойчивой геодезической сети в Ливане является актуальной задачей. Актуальность обусловлена тем, что часть пунктов существующей геодезической сети

утрачена, и это нарушило целостность геодезического построения, а также наличие активной геодинамической составляющей на территории Ливана и близлежащих стран. Геодинамические процессы приводят к сни-

жению точности геодезических станций, что напрямую влияет на точность геодезических работ.

В статье предлагается модель создания новых высокоточных опорных станций в Ливане с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS). Разработанный подход позволит быстро и точно определять координаты вновь устанавливаемых и непрерывно действующих опорных станций (CORS).

На пунктах CORS в режиме реального времени будут определяться координаты, это обеспечит непрерывный мониторинг движения земной коры на территории Ливана, позволит корректировать координаты опорных пунктов после сейсмических событий или других геодинамических процессов.

Предлагаемая модель применения позиционирования высокой точности (PPP – Precise Point Positioning) обеспечит высокоточное позиционирование и в дальнейшем, при создании соответствующего национального сервиса – определение и транслирование дифференциальных поправок на определяемые методом PPP пункты. Сеть опорных станций сыграет ключевую роль в модернизации геодезической инфраструктуры Ливана, повысит точность измерений и поддержит различные специализированные приложения, включая управление земельными ресурсами, инфраструктурой и в проведении научных исследований [1–3].

Цель исследования – изучение применения метода точного позиционирования для определения координат базовых станций непрерывного действия в целях обновления геодезической сети и прогнозирования движения земной коры.

Задачи:

1. Подробно описать поэтапный процесс реализации метода PPP – от выбора мест установки и монтажа станций до выполнения обработки данных для получения точных координат определяемого пункта.

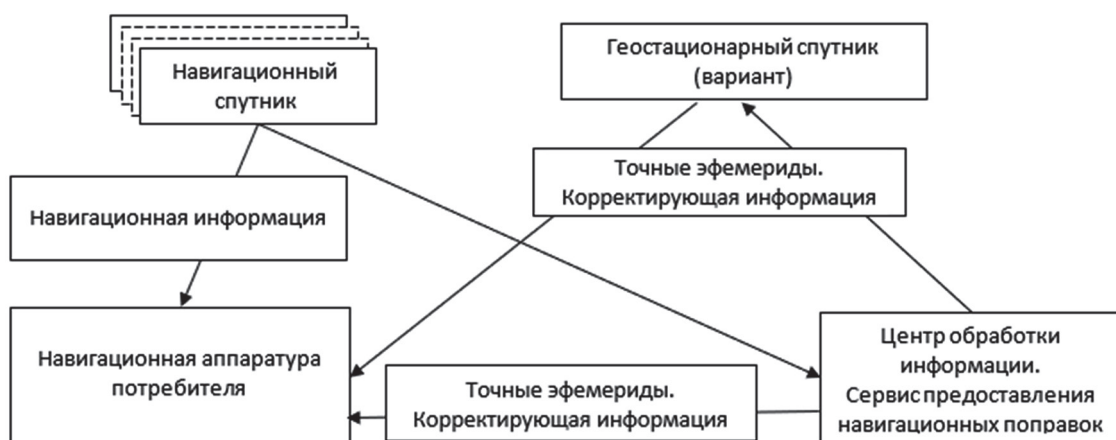
2. Определить соответствие метода позиционирования высокой точности требованиям, предъявляемым к точности опорных станций.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в Ливане, в частности в деревне Райак, расположенной недалеко от г. Баальбек на востоке страны. Этот район был выбран ввиду его стратегического значения и геологических особенностей, имеющих отношение к целям исследования. Близость Райака к Баальбеку создает оптимальные условия для мониторинга геодезических и геодинамических процессов в регионе.

В методе PPP выполняют обработку информации, полученной с одного приемника, с применением дополнительной информации о точных спутниковых орбитах, о поправках часов, а также с применением дополнительных математических моделей, учитывающих влияние различных геофизических и геодинамических факторов (рисунок).

При этом выполняется оценка положения самого приемника, решение неоднозначностей, выявление смещений часов приемника и определение задержки во влажной тропосфере. PPP служит широкому спектру приложений, таких как точное позиционирование, зондирование водяного пара в атмосфере, мониторинг землетрясений и цунами, определение орбиты низкоорбитальных спутников и точного земледелия [4, 5].



Обзор системы точного позиционирования (PPP)

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Было проведено исследование применения PPP для определения пунктов CORS. Метод PPP опирается на прямые наблюдения и точные эфемериды. Прямые наблюдения – это данные, которые GPS-приемник может получить самостоятельно, основной информацией является фаза несущей, дополнительной является дифференциальная задержка между сигналами GNSS разных частот, поэтому в основном в данном методе используют двухчастотные приемники. Точные эфемериды – орбиты спутников GNSS, определяемые геодезическим сообществом с использованием глобальных сетей наземных станций. Существуют «ультрабыстрые» орбиты примерно через 90 мин наблюдений, «быстрые», которые формируются за день-два, и «окончательные», которые определяются примерно за 14 дней. По времени, необходимому на подготовку точных эфемерид, можно сделать вывод, что только первые можно использовать в режиме реального времени, а два других типа – только в режиме постобработки. Для предоставления точных эфемерид, поправок в бортовые часы используются специальные сервисы, которые государство может подготовить самостоятельно или использовать общими. В настоящее время вся информация, необходимая для реализации метода PPP получается от европейской станции распространения навигационной информации. Необходима национальная служба и соответствующие сервисы для полноценной реализации данного метода.

Типичному решению PPP требуется определенный интервал времени для достижения заданной точности, чтобы устранить локальные ошибки, такие как атмосферное влияние, многолучевое распространение радиоволн и смещение приемника в ходе сеанса наблюдения. Фактическая достигнутая точность и необходимое время сходимости зависят от качества поправок и от того, как они применяются в процессе обработки получаемого сигнала [6, 7].

Метод PPP работает по следующей схеме:

- наблюдения – получение приемником навигационной информации;
- получение от специальных сервисов точных эфемерид, поправок в часы, корректирующих моделей и других поправок;
- применение корректирующей информации в режиме реального времени или в режиме постобработки;
- оценка определяемых параметров, координат и полученных редуций фильтром

Калмана или методом наименьших квадратов в последовательной обработке [8].

Вектор определяемых параметров можно записать как

$$X = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \\ dt^t \\ T^t \\ N^t \end{bmatrix}, \quad (1),$$

где X_t, Y_t, Z_t – координаты приемника, обновляются с использованием фильтра Калмана;

dt^t – смещение часов приемника, оценивается и корректируется с использованием точных данных о часах спутника;

T^t – задержка в тропосфере, моделируется и оценивается с использованием фильтра Калмана;

N^t – неопределенность фазы несущей, оценивается как плавающее значение, фиксируется как целое число в методе PPP-AR, с использованием фильтра Калмана.

– координаты приемника, определяются в геоцентрической системе координат на фиксированную эпоху. Метод PPP непрерывно уточняет координаты по мере поступления навигационной и эфемеридно-временной информации, до тех пор, пока не будет достигнута наилучшая возможная точность, процесс обработки завершается либо по достижении заданного периода времени, либо по завершению поступления навигационной информации от спутников;

– коррекция:

• часов приемников относительно часов спутников; в виде

$$P_i^t = \rho^t + c(dt^t - dt^s) \quad (2),$$

где c – скорость света, dt^t – смещение часов приемника, dt^s – смещение часов спутника.

Смещение часов приемника рассматривается как неизвестный параметр, а ошибки часов спутника (dt^s) корректируются с использованием данных от IGS;

• тропосферной задержки:

$$T = T_{\text{«сухая»}} + T_{\text{«влажная»}}, \quad (3),$$

где $T_{\text{сухая}}$ – «сухая» составляющая (примерно 90 % от всей задержки, возможен расчет).

$T_{\text{влажная}}$ – «влажная» составляющая (примерно 10 % от всей задержки, по моделям не рассчитывается). Если доступны данные о погоде в реальном времени, то коррекция может быть осуществлена в процессе обработки.

• неоднозначность измерения фазы несущей:

$$\Phi_i^t = \rho^t + c(dt^t - dt^s) - I_i^t + T^t + \lambda_i N_i^t + \varepsilon_\phi, \quad (4),$$

где λ_i – это длина волны сигнала GPS; N_i^t – разности фаз; ε_ϕ – это фазовый шум / ошибка.

GPS-приемники измеряют фазу несущего сигнала, данный метод значительно точнее, чем измерения по кодовым псевдодальностям. Однако между спутником и приемником существует неизвестное целое число полных циклов, называемое тер-

мином неоднозначности N^t , решение данной неоднозначности призвано сделать измерения точнее. Изначально N_i^t рассматривается как значение с плавающей запятой и оценивается с использованием фильтра Калмана. Если применяется разрешение неоднозначности (PPP-AR), оно фиксируется как целое число, что повышает точность до 1–5 см [9].

Функциональная модель PPP представляет собой явную связь между наблюдениями и неизвестными, недифференциальные уравнения наблюдений представлены в следующем виде [10]:

$$P_{L_i} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) + d_{ion(L_i)} + d_{trop} + d_{hd(P_{L_i})}^r - d_{hd(P_{L_i})}^s + d_{multi(P_{L_i})} + d_{noise(P_{L_i})}, \quad (5)$$

$$\phi_{L_i} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) - d_{ion(L_i)} + d_{trop} - \lambda_{L_i} N_{L_i} + d_{hd(\phi_{L_i})}^r - d_{hd(\phi_{L_i})}^s + d_{multi(\phi_{L_i})} + d_{noise(\phi_{L_i})}, \quad (6)$$

где P_{L_i} и ϕ_{L_i} – уравнения псевдодальности и фазы несущей соответственно, на частоте L_i ; ρ – геометрическое расстояние между спутником и приемником в метрах, d_{orb} – ошибка орбиты спутника в метрах, c – скорость света в вакууме, м/с; dT и dt – погрешность часов спутника и приемника соответственно, в секундах; $d_{ion(L_i)}$ – ионосферное влияние первого порядка на частоту L_i в метрах; d_{trop} – задержка в тропосфере, в метрах; $d_{hd(P_{L_i})}^r$ и $d_{hd(P_{L_i})}^s$ – аппаратные задержки спутника и приемника для псевдодальности соответственно, на частоте L_i , в метрах; $d_{hd(\phi_{L_i})}^r$ и $d_{hd(\phi_{L_i})}^s$ – аппаратные задержки спутника и приемника соответственно, для фазы несущей L_i , в метрах; $d_{multi(P_{L_i})}$ и $d_{multi(\phi_{L_i})}$ –

ошибки многолучевого распространения псевдодальности и фазы несущей соответственно, на частоте L_i , в метрах; $d_{noise(P_{L_i})}$ и $d_{noise(\phi_{L_i})}$ – шумовые ошибки псевдодальности и фазы несущей соответственно на частоте L_i , в метрах; N_{L_i} – целая неоднозначность фазы на частоте L_i , в циклах; λ_{L_i} – длина волны частоты L_i , в метрах.

Традиционные безионосферные линейные комбинации псевдодальности и фазы несущей являются наиболее известными наблюдаемыми величинами, используемыми для смягчения ионосферного эффекта первого порядка. Псевдодальность и свободная от ионосферы фаза несущей формируются в следующих уравнениях [7, 10, 11]:

$$P_{if} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} - \rho + d_{orb} + c(dT - dt) + d_{trop} + d_{hd(P_{if})}^r - d_{hd(P_{if})}^s + d_{multi(P_{if})} + d_{noise(P_{if})}, \quad (7)$$

$$\phi_{if} = \frac{f_1^2 \phi_1 - f_2^2 \phi_2}{f_1^2 - f_2^2} - \rho + d_{orb} + c(dT - dt) - \lambda_{if} N_{if} + d_{trop} + d_{hd(\phi_{if})}^r - d_{hd(\phi_{if})}^s + d_{multi(\phi_{if})} + d_{noise(\phi_{if})}, \quad (8)$$

где N_{if} – целочисленная неопределенность фазы без ионосферы, в циклах; λ_{if} – длина волны без задержки ионосферы, в метрах [12–14].

Основным преимуществом безионосферных комбинаций является исключение членов, учитывающих влияние ионосферы. Недостатком безионосферных линейных комбинаций является шум наблюдения, примерно в три раза превышающий шум на каждой из частот L1 или L2 [10].

Используя различные вариации метода наименьших квадратов, выполняют обра-

ботку измерений, постоянно дополняющих-ся информацией.

Результаты исследования и их обсуждение

Изменение длительности сеанса коррелирует с точностью обработанных координат. Длительные наблюдения увеличивают вероятность разрешения неоднозначности и уменьшения влияния многолучевости распространения сигнала. В табл. 1 показана зависимость между продолжительностью сеанса наблюдений и точностью получаемых координат.

Таблица 1

Связь продолжительности наблюдения и точности измерения статического PPP

Продолжительность наблюдения, мин	Точность статического PPP с использованием смешанных наблюдений GPS/ГЛОНАСС, с вероятностью 95 %				
	y, (м)	x, (м)	h, (м)	В плане, (м)	Общая, (м)
10	0,629	0,843	1,283	1,052	1,659
20	0,256	0,322	0,475	0,411	0,628
30	0,146	0,171	0,275	0,225	0,355
45	0,088	0,092	0,168	0,127	0,211
60	0,064	0,060	0,131	0,088	0,158
90	0,040	0,037	0,093	0,054	0,108
120	0,024	0,028	0,065	0,037	0,075
150	0,016	0,021	0,051	0,026	0,057
180	0,011	0,018	0,042	0,021	0,047
240	0,008	0,013	0,029	0,015	0,033
360	0,005	0,010	0,020	0,011	0,023
480	0,004	0,008	0,015	0,009	0,017
600	0,003	0,006	0,013	0,006	0,014
720	0,002	0,005	0,011	0,005	0,012

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Географические координаты станций для решения PPP

Станция	Широта (DMS)	СКП, (м)	Долгота (DMS)	СКП, (м)	Геодезическая высота (м)	СКП, (м)
BUCU (Румыния)	44 27 50.20906	0,006	26 07 32.68616	0,007	143.242	0,013
DYNG (Греция)	38 04 42.78692	0,006	23 55 56.76703	0,006	510.567	0,012
GANP (Словакия)	49 02 04.97705	0,008	20 19 22.58736	0,009	746.034	0,021
GLSV (Украина)	50 21 51.06579	0,006	30 29 48.25773	0,006	226.320	0,013
GRAZ (Австрия)	47 04 01.67750	0,006	15 29 36.54842	0,006	538.284	0,012
JOZ2 (Польша)	52 05 52.21776	0,005	21 01 56.48478	0,006	152.517	0,012
MAT1 (Италия)	40 38 56.63516	0,008	16 42 16.38534	0,008	534.522	0,018
MEDI (Италия)	44 31 11.85708	0,006	11 38 48.55243	0,007	49.991	0,013
POLV (Украина)	49 36 09.41773	0,005	34 32 34.57052	0,007	178.337	0,013
SOFI (Болгария)	42 33 21.94803	0,008	23 23 41.05681	0,011	1119.502	0,016
ZECK (Россия)	43 47 18.22120	0,006	41 33 54.25995	0,007	1166.296	0,013

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Точность геодезических сетей в Ливане

Класс	Назначение	Точность в плане, мм	Точность по высоте, мм
Первый класс	Национальная опорная основа	5	10
Второй класс	Региональный контроль и сгущение сети	10	15
Третий класс	Обеспечение картографирования	25	30
Четвертый класс	Для обеспечения инженерных и кадастровых работ	50	60

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В табл. 2 показаны данные постоянно действующих станций IGS (<https://network.igs.org/>), которые использовались для получения решения PPP.

В Ливане геодезическая сеть подразделяется на четыре основных класса по точности, как показано в табл. 3.

Выводы

При проектировании геодезической сети необходимо определить требуемый уровень точности, чтобы выбрать наилучший метод PPP для достижения необходимой точности пунктов создаваемой сети CORS.

Исследование показало:

1. Применение метода PPP позволяет добиться точности второго класса, с последующим уравниванием.

2. Используемые для реализации метода PPP станции IGS находятся на значительном удалении и поэтому не позволяют достичь точности геодезической сети первого класса, этот метод можно использовать для создания пунктов геодезической сети второго, третьего и четвертого классов.

На основании полученных данных сформулированы следующие рекомендации по применению станций CORS в Ливане:

- обеспечить равномерное покрытие территории страны станциями CORS;

- методика модернизации геодезической сети первого класса может использовать данные определенные пункты только как предварительные с последующим уравниванием для достижения необходимой точности;

- уравнинную сеть первого класса использовать как основу для создания сетей младших классов, уменьшая, таким образом, расстояние до базовых станций при применении метода PPP;

- создать свой сервер по определению поправок для обслуживания потребителей, использующих «быстрый» метод PPP.

Список литературы

1. Акл М.Н. Элементы методики модернизации спутниковой геодезической сети в геологически неустойчивом районе // Успехи современного естествознания. 2023. № 6. С. 113–121. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/>

view?id=38061 (дата обращения: 18.07.2025). DOI: 10.17513/use.38061.

2. Madani S.A., Sadoun B., Al-Bayari O. Continuously operating reference station and surveying applications in KSA // International Journal of Communication Systems. 2015. Vol. 29, Is. 6. P. 1046–1056. DOI: 10.1002/dac.3035.

3. Angrisano A., Dardanelli G., Innac A., Pisciotto A., Pipitone C., Gaglione S. Performance assessment of PPP surveys with open source software using the GNSS GPS-GLONASS-Galileo constellations // Applied Sciences (Switzerland). 2020. Vol. 10, Is. 16. P. 5420. DOI: 10.3390/app10165420.

4. Jin S., Su K. PPP models and performances from single-to quad-frequency BDS observations // Satellite Navigation. 2020. Vol. 1. P. 16. DOI: 10.1186/s43020-020-00014-y.

5. Geoscience Australia. AUSPOS – Online GPS Processing Service. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/positioning-australia/geodesy/auspos> (дата обращения: 05.07.2025).

6. Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations // Journal of Geodesy. 2008. Vol. 82. P. 389–399. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4.

7. Qafisheh M., Martín A., Capilla R., Julián A. SVR and ARIMA models as machine-learning solutions for solving the latency problem in real-time clock corrections // GPS Solutions. 2022. Vol. 26, Is. 3. P. 85. DOI: 10.1007/s10291-022-01270-y.

8. Budimirov T., Bulatović V., Marković M., Batilović M., Sušić Z. Precise Point Positioning – PPP method // Civil Engineering – Science & Practice” (GNP 2022). Proc. 8th Int. Conf. (Kolašin, Montenegro, 8–12 March 2022). P. 891–898. URL: <https://repository.ukim.mk/bitstream/20.500.12188/29647/1/GNP%20Proceedings%202022%202.pdf> (дата обращения: 25.06.2025). ISBN: 9788682707356.

9. 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, Is. 1. P. 22–31. DOI: 10.2478/jogs-2013-0001.

10. Zumberge J.F., Hefflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1997. Vol. 102, Is. B3. P. 5005–5017. DOI: 10.1029/96JB03860.

11. Zumberge J.F., Watkins M.M., Webb F.H. Characteristics and applications of precise GPS clock solutions every 30 seconds // Navigation. 1997. Vol. 44, Is. 4. P. 449–456. DOI: 10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x.

12. Abou-Galala M., Rabah M., Kaloop M., Zidan Z. Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57, Is. 3. P. 1721–1726. DOI: 10.1016/j.aej.2017.04.019.

13. Budimirov T., Bulatović V. Performance analysis of PPP positioning method by using IGS real-time service // Geodetski Vestnik. 2018. Vol. 62, Is. 4. P. 604–618. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2018.04.604-618.

14. Marques H.A., Marques H.A.S., Aquino M., Veettil S.V., Monico J.F.G. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects // Journal of Space Weather and Space Climate. 2018. Vol. 8. P. A15. DOI: 10.1051/swsc/2017043.