

УДК 629.783:528.236

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-34-41

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ НАГРУЗОК НА РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЗДАНИЯ СТАНЦИОННОГО УЗЛА ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2 МЕТОДОМ PPP

Владислав Валерьевич Калинин

Университет Иннополис, 420500, Россия, г. Иннополис, ул. Университетская, 1, кандидат физико-математических наук, главный инженер проектов центра геоинформационных систем, e-mail: vlad-kalinnikov@mail.ru

Александр Валерьевич Устинов

Филиал АО «Институт Гидропроект» – «ЦСГНЭО», 125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, начальник отдела, e-mail: a.ustinov@hydroproject.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ст. преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела

Николай Сергеевич Косарев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

На основе опытных измерений, выполненных на Загорской ГАЭС-2, рассмотрена возможность применения метода Precise Point Positioning (PPP) в системе комплексного мониторинга гидротехнических сооружений. Показано, что абсолютные значения координат точек мониторинга, определенные методом PPP, достаточно сильно подвержены влиянию атмосферных нагрузок, возникающих из-за изменения атмосферного давления. По теоретическим исследованиям вертикальные смещения, обусловленные этим эффектом, могут составлять до 25 мм, горизонтальные – до 1/3 от этой величины. Авторами на основе сравнительного анализа были получены следующие выводы. Рассчитанные методом PPP в программном продукте TropicGNSS среднесуточные значения координат мониторинговой станции PS34 с высокой вероятностью коррелируют с рядами деформаций земной коры в районе расположения Загорской ГАЭС-2, вычисленные с помощью онлайн-сервиса International Mass Loading Service. Вариации среднесуточных значений координат мониторинговой станции позволяют уверенно идентифицировать деформации земной коры величиной порядка 5 мм. Это говорит, с одной стороны, о сравнительно высокой точности результатов применения метода PPP, а с другой, – о необходимости применения внешних моделей атмосферных нагрузок для использования метода PPP в качестве эффективного инструмента для мониторинга сложных динамических объектов, в частности гидротехнических сооружений. Применение внешних моделей атмосферных нагрузок может позволить обеспечить нормативную точность наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин методом PPP.

Ключевые слова: Загорская ГАЭС-2, гидротехнические сооружения, автоматизированный мониторинг, ГНСС, атмосферные нагрузки, PPP, TropicGNSS.

Введение

С целью обеспечения безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) и прилегающей территории необходимо в процессе эксплуатации проводить мониторинг технического состояния ГТС для своевременного принятия необходимых оперативных и инженерных решений при появлении и развитии деформационных процессов [1–4].

В настоящее время для деформационного мониторинга инженерных сооружений широко применяются методы ГНСС-технологий, которые, в отличие от классических методов мониторинга, обладают достаточно высокой точностью, оперативностью, возможностью производить круглосуточный мониторинг в режиме реального времени [5–6]. В основу мониторинга ГТС с использованием ГНСС-технологий положен анализ положения мони-

торинговых приемников, располагающихся на гребне плотины, относительно базовых станций, установленных на стабильном основании, вне зоны деформаций плотины [7–10]. Для достижения высокой точности определения координат мониторинговых точек используется концепция RTN (Real Time Network), заключающаяся в следующем. Базовые и мониторинговые ГНСС-приемники собирают спутниковые измерения, которые затем по коммуникационным каналам передаются в режиме реального времени на сервер в центр управления. На сервере «разворачивается» специализированное программное обеспечение (СПО) для управления базовыми и мониторинговыми ГНСС-приемниками. СПО объединяет все измерения и выдает сетевое решение по каждой мониторинговой станции.

Однако в связи с рядом ограничений, связанных, в основном, с влиянием различных факторов, понижающих точность координатных определений, применение ГНСС-технологий не позволяет производить мониторинг технического состояния ГТС с требуемыми нормативными допусками.

Одним из таких негативных факторов является многопутность (многолучевость), влияние которой исключается выбором мест расположения опорных и мониторинговых приемников. Другой фактор – сложность учета остаточного влияния тропосферной рефракции, возникающего из-за большой разности высот вектора базовой линии. Существуют и другие факторы, которые накладывают ограничения на использование спутниковых измерений для мониторинга гидротехнических сооружений. Тем не менее, ГНСС-технологии активно применяются в комплексных автоматизированных системах мониторинга ГТС, где они выполняют функцию контроля положения опорных пунктов сети [5, 6].

В настоящее время в научной литературе активно обсуждается применение метода Precise Point Positioning (PPP) для мониторинга сложных динамических объектов с получением дециметрового и сантиметрового уровня точности в режиме реального времени [11–13]. Такая высокая точность определения координат одним приемником

достигается за счет применения точных апостериорных параметров орбит (эфemerид) и поправок к часам спутников, а также учетом таких основных ошибок, как ионосферная и тропосферная задержки. Дополнительно в методе PPP исключаются ошибки, которые могут вызывать значительные (до нескольких сантиметров) изменения в фазовых наблюдениях. К ним относят смещение фазового центра антенны спутника, эффекты в смещении пункта из-за приливов в твердой Земле, океанические нагрузки и поправка за набег фазы.

Кроме этого, из-за периодических и непериодических изменений давления на земную поверхность оказывают влияние так называемые атмосферные нагрузки, которые приводят к тому, что земная поверхность деформируется. Для оценки вертикального смещения, обусловленного периодическим изменением давления, используется упрощенная формула:

$$dh = -0,35 \cdot p_{\text{аном}} - 0,55 \cdot \bar{p}_{\text{аном}} \quad (1)$$

где $p_{\text{аном}}$ – аномалия локального давления относительно стандартного давления, редуцированного на высоту пункта, в мбар;

$\bar{p}_{\text{аном}}$ – аномалия давления в круговой области радиусом 2 000 км, в мбар.

По теоретическим исследованиям вертикальные смещения из-за атмосферных нагрузок могут составлять до 25 мм, горизонтальные – до 1/3 от этой величины [14].

Таким образом, атмосферные нагрузки, возникающие из-за изменения атмосферного давления, должны быть учтены в методе PPP, для того, чтобы использовать его в качестве эффективного инструмента для мониторинга сложных динамических объектов, в частности гидротехнических сооружений.

Цель исследования

Целью исследования является анализ влияния атмосферных нагрузок, возникающих из-за изменения атмосферного давления, на результаты спутникового мониторинга гидротехнических сооружений методом PPP. В качестве тестового объекта для

исследования было выбрано здание станционного узла Загорской ГАЭС-2.

Исходные данные

Загорская ГАЭС-2 располагается в 2,4 км от устья реки Куньи в Сергиево-Посадском районе Московской области, недалеко от села Богородское на расстоянии около 900 м

к югу от створа основных сооружений Загорской ГАЭС (рис. 1).

В конце сентября 2013 г. специалистами ОАО «Институт Гидропроект» на станционном узле Загорской ГАЭС-2 была развернута опытная система спутникового геодезического мониторинга, которая включала в себя восемь ГНСС-приемников: один базовый и семь мониторинговых (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид Загорской ГАЭС-2

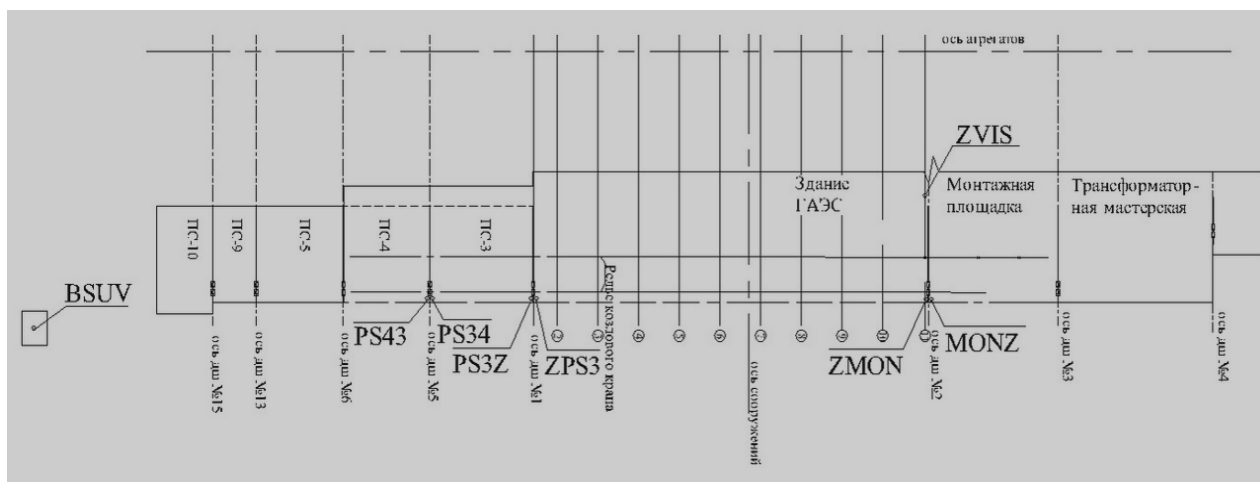


Рис. 2. Схема экспериментальной сети Загорской ГАЭС-2

На всех пунктах системы спутникового геодезического мониторинга установлены ГНСС-приемники GM10 фирмы Leica Geosystems (Швейцария) с антеннами типа Choke Ring. Базовый ГНСС-приемник (BSUV) находится вне зоны деформаций здания ГАЭС на расстоянии около 60 м. Контроль стабильности пункта BSUV осуществлялся относительно других пунктов опорной геодезической сети Загорской ГАЭС-2 методом линейно-угловых измерений согласно программе натуральных наблюдений.

Методика обработки исходных данных

Для достижения поставленной цели авторами проанализированы месячные данные мониторинговой станции PS34. Обработка данных проводилась методом PPP в программном продукте TropoGNSS [15, 16]. Программный продукт TropoGNSS позволяет определять высокоточные координаты ГНСС-станций, оценивать ошибки часов приемника, а также выдавать временные ряды зенитной тропосферной задержки и градиентные тропосферные параметры. Точность оценки всех выходных параметров зависит от продолжительности измерений, а также от числа использованных в обработке навигационных

систем. При обработке измерений суточной продолжительности точность определения координат составляет 1–3 мм.

При обработке измерений использовались суточные измерения с дискретностью 30 секунд, маска по высоте составляла 7 градусов. По результатам обработки в программном продукте TropoGNSS были получены временные ряды среднесуточных значений координат мониторинговой станции PS34.

Результаты исследования

Для оценки влияния атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 авторами был выполнен сравнительный анализ рассчитанных в программном продукте TropoGNSS среднесуточных значений координат мониторинговой станции PS34 с рядами деформаций земной коры в районе расположения Загорской ГАЭС-2, вычисленных с помощью онлайн-сервиса International Mass Loading Service [17]. На рис. 3–5 показано сопоставление рядов координат ГНСС-станции, полученных методом PPP, с деформациями земной коры, вычисленными с помощью указанного сервиса.

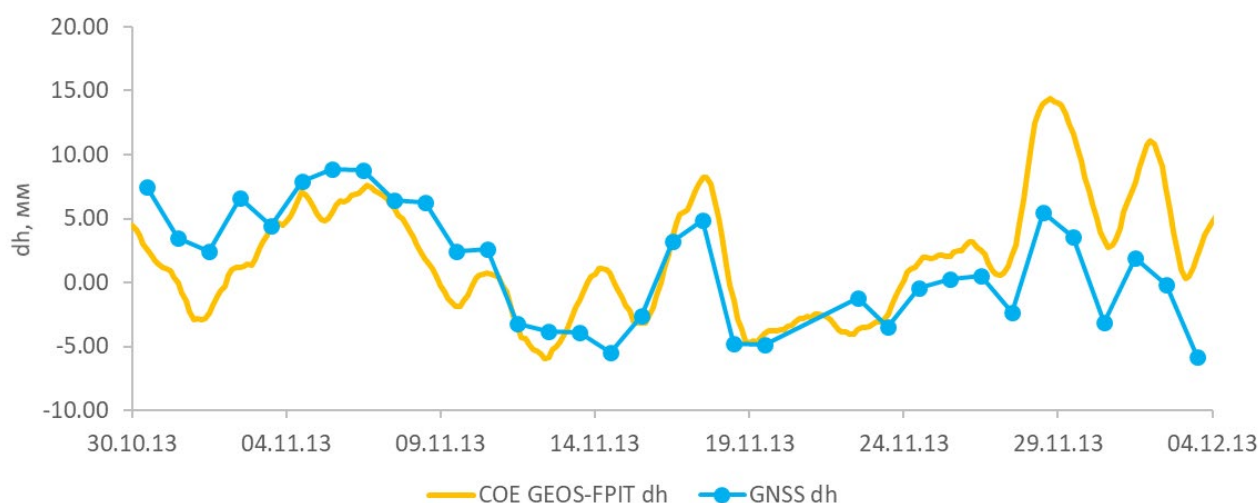


Рис. 3. Сопоставление рядов высотной компоненты, полученных из модельных данных (GEOS-FPIT) и измеренных на станциях с помощью ГНСС

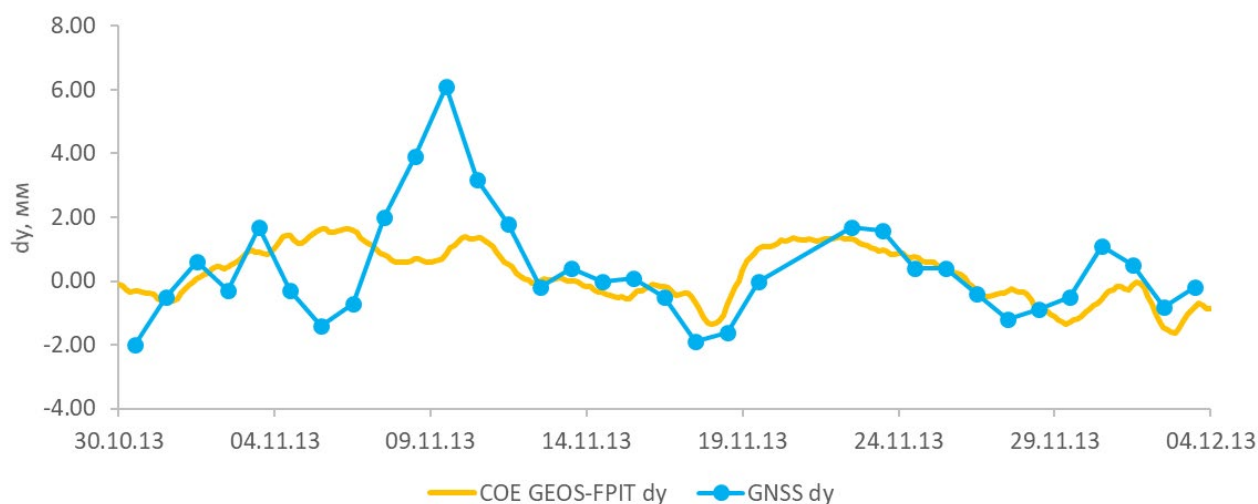


Рис. 4. Сопоставление рядов восточной компоненты, полученных из модельных данных (GEOS-FPIT) и измеренных на станциях с помощью ГНСС

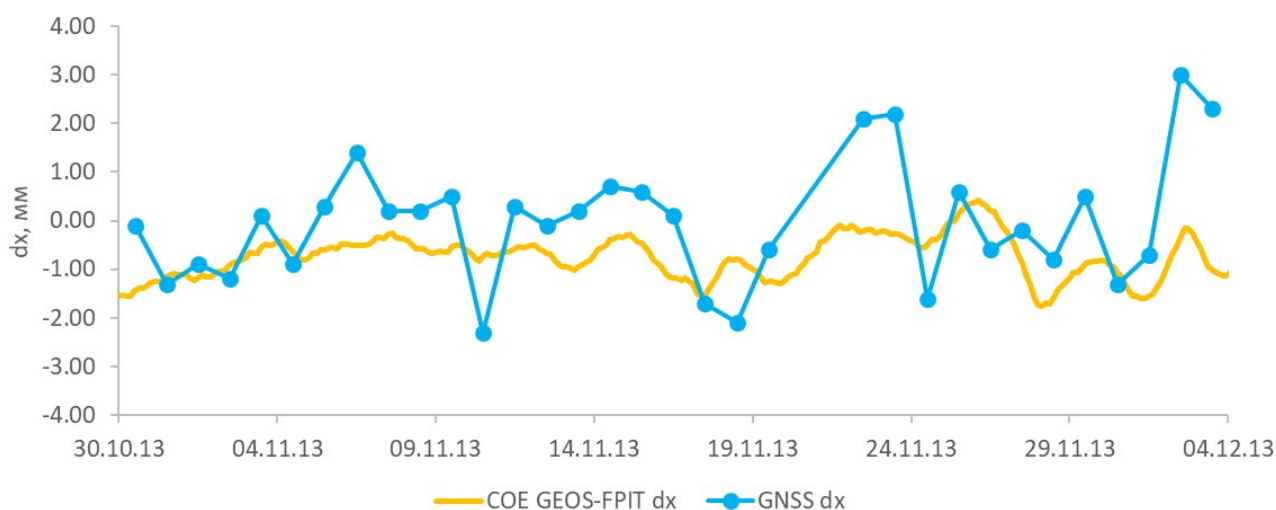


Рис. 5. Сопоставление рядов северной компоненты, полученных из модельных данных (GEOS-FPIT) и измеренных на станциях с помощью ГНСС

Как можно хорошо видеть, смещения высотной координаты наиболее коррелированы с модельными данными. Корреляция в изменениях плановых координат слабее, но все же отчетливо проявляется. При этом вариации среднесуточных значений координат мониторинговой станции PS34, полученные методом PPP, позволяют уверенно идентифицировать деформации земной коры величиной порядка 5 мм. Это говорит, с одной стороны, о сравнительно высокой точности результатов применения метода PPP, а с другой, о необходимости применения внешних моделей атмосферных нагрузок для интерпретации этих результатов. Применение таких моделей может позволить обеспечить

нормативную точность наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин методом PPP [18].

Заключение

Результаты исследования показали, что абсолютные значения координат (как плановых, так и высотных) точек мониторинга, определенных методом PPP, достаточно сильно подвержены влиянию атмосферных нагрузок, возникающих из-за изменения атмосферного давления. Однако уже сейчас для долговременного контроля положения опорных пунктов мониторинга в комплексных системах могут быть использованы и абсолютные значе-

ния координат, которые невозможно определить дифференциальными методами.

Дальнейшие исследования по применению метода PPP для мониторинга гидротехнических сооружений будут направлены на обработку и анализ более длинных рядов измерений, и сопоставление этих результатов с измерениями, выполненными с помощью

традиционных технологий. Анализ временных рядов измерений каждой мониторинговой станции Загорской ГАЭС-2 позволит, помимо всего прочего, оценить и другие источники ошибок, оказывающие влияние на точность определения координат, в частности локальные неоднородности поля водяного пара между станциями мониторинга [19].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кафтан В. И., Устинов А. В. Применение глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 12. – С. 11–19.
2. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.
3. Устинов А. В. Результаты мониторинга вертикальных перемещений в процессе компенсационного нагнетания на опытном участке Загорской ГАЭС-2 // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 128–141.
4. Методика метрологической поверки ГНСС приемников системы мониторинга высоконапорной ГЭС / А. П. Карпик, Н. С. Косарев, К. М. Антонович, А. П. Решетов, А. В. Устинов // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 34–43.
5. Cranenbroeck J. GNSS-technologies application for structural deformation monitoring // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 29–40.
6. Устинов А. В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 6. – С. 39–43.
7. Behr J., Hudnut K., King N. Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California using continuous GPS // In Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, TN, USA, 15–18 September 1998. – P. 59–68.
8. Estimating and Comparing Dam Deformation Using Classical and GNSS Techniques / R. Barzaghi, N. E. Cazzaniga, C. I. De Gaetani, L. Pinto, V. Tornatore // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – P. 756.
9. Monitoring displacements of an earthen dam using GNSS and remote sensing / G. Dardanelli, G. La Loggia, N. Perfetti, F. Capodici, L. Puccio, A. Maltese // SPIE Remote Sens. – 2014. – Vol. 923928. – P. 16.
10. Bond J., Kim D., Fletcher J. Structural Monitoring of the Mactaquac Dam using GPS Sensors // In 5th Canadian conference on geotechnique and natural hazards. – Kelowna, Canada, 2011. – 40 p.
11. Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn Suspension Bridge, UK / X. Tang, G. Roberts, X. Li, C. Hancock // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 60 (5). – P. 925–937.
12. Yigit C. O., Gurlek E. Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2017. – Vol. 8 (2). – P. 893–904.
13. Калинин В. В., Устинов А. В., Загреддинов Р. В. Результаты экспериментальных исследований применения технологии PPP для глобальных навигационных спутниковых систем мониторинга Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 2. – С. 2–7.
14. IERS Conventions (1996) / D. D. McCarthy, G. Petit (Eds.). – Frankfurt and Main : Central Bureau of IERS, 1997. – 278 p.
15. Kalinnikov V., Khutorova O. Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia // Annales Geophysicae. – 2017. – No. 35. – P. 453–464.
16. The Precise Point Positioning Method (PPP) in environmental monitoring applications / V. V. Kalinnikov, A. V. Ustinov, R. V. Zagretdinov, A. V. Tertyshnikov, N. S. Kosarev // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112086S (18 December 2019). doi: 10.1117/12.2539130.
17. International Mass Loading Service (IMLS) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://massloading.net/>.
18. П 83-2001. Рекомендации по анализу данных и проведению натурных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин. – СПб. : ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2001. – 24 с.

19. Калинин В. В., Устинов А. В., Загреддинов Р. В. Влияние неоднородностей поля водяного пара в приземном слое атмосферы в районе водохранилищ на результаты спутникового

мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 3. – С. 19–25.

Получено 30.04.2020

© В. В. Калинин, А. В. Устинов, Н. С. Косарев, 2020

IMPACT OF ATMOSPHERIC LOADINGS ON THE RESULTS OF GNSS MONITORING OF MAIN BUILDING OF ZAGORSKAYA PSPP-2 BY PPP METHOD

Vladislav V. Kalinnikov

Innopolis University, 1, Universitetskaya St., Innopolis, 420500, Russia, Ph. D., Chief Project Engineer, Center of Geographic Information Systems, e-mail: vlad-kalinnikov@mail.ru

Alexander V. Ustinov

Branch of JSC "Institute Hydroproject" – "CSGNEO", 2, Volokolamsk Highway, Moscow, 125993, Russia, Head of Department, e-mail: a.ustinov@hydroproject.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying

Nikolay S. Kosarev

Siberian State University of Geosystems and Technology, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

The possibility of using the Precise Point Positioning (PPP) method in the system of integrated monitoring of hydraulic structures is study. Example of measurements in the system of monitoring the Zagorskaya PSPP-2 is shown. The absolute values of the coordinates of monitoring points determined by the PPP method are quite strongly affected by atmospheric loads arising from changes in atmospheric pressure. According to theoretical studies, vertical displacements due to this effect can be up to 25 mm, horizontal up to 1/3 of this value. The results of comparative analysis are obtained and the conclusions are done. The average daily values of the PS34 monitoring station coordinates calculated by the PPP method in the TropoGNSS software product are highly correlate with the series of crustal deformations in the area of Zagorskaya PSPP-2, calculated using the International Mass Loading Service online service, and the vertical coordinate is more correlated with the model data than the horizontal coordinates. Variations in the average daily values of the coordinates of the monitoring station allow us to identify crustal deformations of the order of 5 mm. This indicates a relatively high accuracy of the results of the PPP method and the need to apply external models of atmospheric loads. The use of external models of atmospheric loads can to ensure the required accuracy of observations of vertical and horizontal displacements of concrete dams by the PPP method.

Key words: Zagorskaya PSPP-2, hydraulic structures, automated monitoring, GNSS, atmospheric loads, PPP, TropoGNSS.

REFERENCES

1. Kaftan, V. I., & Ustinov, A. V. (2012). Use of global navigation satellite systems for monitoring deformations of hydraulic constructions. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]*, 12, 11–19 [in Russian].
2. Sholomitsky, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2017). High Precision Geodetic Measurements at Deformation Monitoring of Aquapark. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 45–59 [in Russian].
3. Ustinov, A. V. (2018). The results of the monitoring of vertical displacements in the process of compensation grouting at the experimental site of Zagorskaya PSP-2. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 128–141 [in Russian].

4. Karpik, A. P., Kosarev, N. S., Antonovich, K. M., Reshetov, A. P., & Ustinov, A. V. (2019). Method of metrological inspection of GNSS receivers of a high-connector HEPS monitoring system. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 34–43 [in Russian].
5. Cranenbroeck, J. (2012). GNSS-technologies application for structural deformation monitoring. *Vestnik SGA [Vestnik SSGA]*, 17(1), 29–40 [in Russian].
6. Ustinov, A. V. (2014). Technology of satellite geodetic monitoring of hydropower structures. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]*, 6, 39–43 [in Russian].
7. Behr, J., Hudnut, K., & King, N. (1998). Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California using continuous GPS. In *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 15–18 September 1998* (pp. 59–68). Nashville, TN, USA.
8. Barzaghi, R., Cazzaniga, N. E., De Gaetani, C. I., Pinto, L., & Tornatore, V. (2018). Estimating and Comparing Dam Deformation Using Classical and GNSS Techniques. *Sensors*, 18, P. 756.
9. Dardanelli, G., La Loggia, G., Perfetti, N., Capodici, F., Puccio, L., & Maltese, A. (2014). Monitoring displacements of an earthen dam using GNSS and remote sensing. *SPIE Remote Sens.*, 923928, P. 16.
10. Bond, J., Kim, D., & Fletcher, J. (2011). Structural Monitoring of the Mactaquac Dam using GPS Sensors. In *5th Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards* (40 p.). Kelowna, Canada.
11. Tang, X., Roberts, G., Li, X., & Hancock, C. (2017). Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn Suspension Bridge, UK. *Advances in Space Research*, 60(5), 925–937.
12. Yigit, C. O., & Gurlek, E. (2017). Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 893–904.
13. Kalinnikov, V. V., Ustinov, A. V., & Zagretdinov, R. V. (2020). The results of experimental studies on the use of PPP technology for GNSS monitoring of Sayano-Shushenskaya HPP. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*, 2, 2–7 [in Russian].
14. McCarthy, D. D., & Petit, G. (Eds.). (1996). *IERS Conventions*. Frankfurt and Main: Central Bureau of IERS, 278 p.
15. Kalinnikov, V., & Khutorova, O. (2017). Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia. *Annales Geophysicae*, 35, 453–464.
16. Kalinnikov, V. V., Ustinov, A. V., Zagretdinov, R. V., Tertyshnikov, A. V., & Kosarev, N. S. (2019). The Precise Point Positioning Method (PPP) in environmental monitoring applications. *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112086S (18 December 2019)*. doi: 10.1117/12.2539130.
17. International Mass Loading Service (IMLS). (n. d.). Retrieved from <http://massloading.net/>
18. P 83-2001. (2001). Recommendations on Data Analysis and Field Observation of Precipitation and Horizontal Shifts of Concrete Dams. St. Petersburg: JSC "Vedeneev VNIIG", 24 p. [in Russian].
19. Kalinnikov, V. V., Ustinov, A. V., & Zagretdinov, R. V. (2018). Influence of Irregularities of Water Vapor Field in Surface Layer of the Atmosphere on the Results of Satellite Monitoring of Hydropower Structures in Region of Reservoirs. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]*, 3, 19–25 [in Russian].

Received 30.04.2020

© V. V. Kalinnikov, A. V. Ustinov, N. S. Kosarev, 2020