

УДК 006:629.783:[528.48:626]
DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-34-43

МЕТОДИКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВЕРКИ ГНСС-ПРИЕМНИКОВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВЫСОКОНАПОРНОЙ ГЭС

Александр Петрович Карник

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, ректор, тел. (383)343-39-37, e-mail: rectorat@ssga.ru

Николай Сергеевич Косарев

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

Константин Михайлович Антонович

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)361-01-59, e-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

Александр Петрович Решетов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, руководитель научно-производственного центра информационных технологий, тел. (383)344-44-71

Александр Валерьевич Устинов

АО «Институт Гидропроект», 125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, заместитель начальника комплексного отдела изысканий, e-mail: a.ustinov@hydroproject.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела

В статье приведена методика метрологической поверки ГНСС-приемников системы спутникового геодезического мониторинга высоконапорной ГЭС. Суть методики заключается в следующем. На расстоянии 3–10 км от плотины разбивается эталонный пространственный базис, состоящий не менее чем из 5 пунктов. Линии базиса измеряются эталонной ГНСС-аппаратурой. Затем в режиме статики измеряются базовые линии, образованные пунктами базиса и поверяемой аппаратурой системы мониторинга. Выполняется сравнение между вычисленными и эталонными значениями расстояний и превышений пространственного базиса.

По результатам проведенной метрологической поверки ГНСС-приемников системы спутникового геодезического мониторинга высоконапорной ГЭС погрешности оборудования находятся в пределах допуска. Предложенная в статье методика поверки ГНСС-приемников системы спутникового мониторинга высоконапорной ГЭС может быть применена для метрологической поверки ГНСС-приемников в системах мониторинга деформаций уникальных зданий и сооружений, а также в сетях постоянно действующих базовых станций.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), метрологическая поверка, методика поверки, высоконапорная ГЭС, деформационный мониторинг, автоматизированный мониторинг, пространственный базис.

Введение

В настоящее время ГНСС-технологии активно используются для решения целого комплекса фундаментальных и прикладных задач, таких как создание высокоточных геодезических сетей, сетей специального назначения, деформационный мониторинг уникальных зданий и сооружений [1–8]. При этом, в соответствии с Федеральным законом от 26.06.2008 № 102 «Об обеспечении единства измерений», возникает необходимость в ежегодной метрологической поверке ГНСС-аппаратуры [9]. Метрологическая поверка осуществляется в соответствии с МИ 2408-97 «Рекомендация ГСИ. Аппаратура пользователей космических навигационных систем геодезическая. Методика поверки», или ГОСТ Р 8.793–2012 [10], что регулируется в сертификатах Госстандарта на спутниковую геодезическую аппаратуру (СГА) пользователей космических навигационных систем (КНС).

В соответствии с ГОСТ Р 8.793–2012 [10] методика поверки СГА заключается в сравнении компонент эталонных линий, полученных высокоточной геодезической аппаратурой и аппаратурой, которая поверяется. Аппаратура соответствует своим метрологическим характеристикам, если ошибки в плане (m_D) и по высоте (m_h) не превышают с доверительной вероятностью 0,95 погрешностей измерений, увеличенных в θ раз:

$$m_D^{\text{доп}} = \theta \cdot (a + b \cdot D \cdot 10^{-6}); \quad (1)$$

$$m_h^{\text{доп}} = \theta \cdot (a' + b' \cdot D \cdot 10^{-6}), \quad (2)$$

где a , b , a' , b' – паспортные характеристики точности ГНСС-аппаратуры; D – расстояние между пунктами (в км); θ – квантиль.

Особым случаем метрологической поверки является поверка ГНСС-аппаратуры, установленной на уникальных зданиях и сооружениях для постоянного деформационного мониторинга в режиме реального времени. Особенность поверки такой аппаратуры заключается в том, что спутниковые приемники в системах мониторинга деформаций уникальных зданий и сооружений не допускают их удаления на время метрологической поверки, поскольку это приводит к появлению сигнала тревоги или нарушению целостности всей системы мониторинга. Поэтому разработка методики поверки ГНСС-аппаратуры, работающей в режиме слежения за крупными сооружениями, является актуальной задачей, которая требует нетривиального решения.

Целью настоящей статьи является описание методики метрологической поверки ГНСС-приемников высоконапорной ГЭС.

Общие сведения о системе спутникового мониторинга ГЭС

Система спутникового мониторинга ГЭС (рис. 1), на которой отрабатывалась методика, представлена 10 станциями мониторинга, из них 7 станций раз-

мещены на гребне плотины, а 3 станции – на бортах русла реки. Станции, расположенные на бортах русла реки, являются базовыми. Средние расстояния между базовыми станциями и станциями, размещенными на гребне плотины, составляют 600, 1 550 и 1 530 м, соответственно.

Для управления станциями мониторинга используются специальные программные комплексы: Leica GNSS Spider и Leica GeoMoS [11].

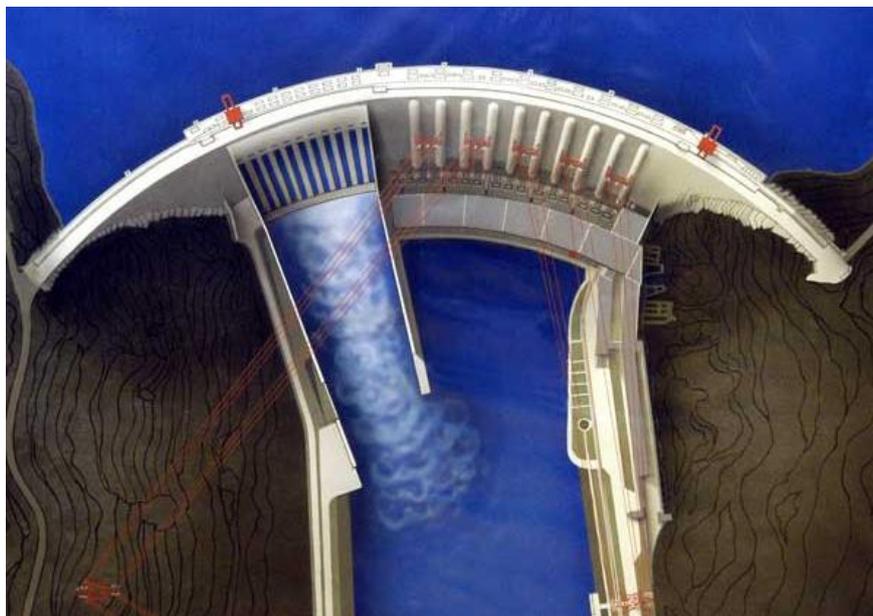


Рис. 1. Высоконапорная ГЭС (Генплан)

Описание методики

Методика метрологической поверки ГНСС-приемников высоконапорной ГЭС заключается в следующем. Пункты, расположенные на бортах русла реки, а также точки мониторинга, размещенные на гребне плотины, используются в качестве опорных.

При отсутствии явных сбоев в работе станций мониторинга накопленные на них данные обрабатываются совместно с наблюдениями на станциях сети отсчетной основы ITRF.

На расстоянии 3–10 км от плотины разбивается эталонный пространственный базис (ЭПБ), состоящий не менее чем из 5 точек. Расстояния между точками должны составлять 200–500 м. Ориентировка базиса произвольная, расположение точек в створе не требуется. Точки могут быть выше или ниже плотины по течению. Желательно точки ЭПБ располагать на высоте гребня плотины. При этом недопустимо наличие ЛЭП в пределах 500 м. Над точками ЭПБ устанавливаются штативы с трегерами. Тахеометром измеряются расстояния и превышения между 1-й и остальными точками с погрешностью порядка 1 мм. Одновременно с наблюдениями в системе спутникового мониторинга ГЭС эталонной ГНСС-аппаратурой измеряются векторы всех четырех базовых линий

по схеме 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 (длительность сеанса – не менее 60 мин). Данные электронного тахеометра используются как контрольные, так как необходимо знать уклоны отвесной линии в районе работ.

С помощью специализированного программного обеспечения производится обработка выполненных измерений, по полученным с опорных пунктов трехмерным координатам точек базиса определяются значения наклонных расстояний и превышений по линиям 1-2, 1-3, 1-4, 1-5. Выполняется сравнение измеренных косвенным методом и эталонных значений расстояний и превышений эталонно-линейного базиса (ЭЛБ). Аппаратура соответствует паспортным метрологическим характеристикам, если ошибки в плане и по высоте не превышают удвоенных допустимых погрешностей измерений.

Результаты метрологической поверки

Для апробации предложенной методики на расстоянии около 5 км от плотины вниз по течению электронным тахеометром LEICA TM30 был разбит эталонный пространственный базис, состоящий из 5 точек. Общая длина базиса составила 1 432,447 м. На всех точках базиса эталонной аппаратурой СГУГиТ были выполнены ГНСС-измерения по схеме 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 с длительностью сеанса не менее 60 мин. В качестве эталонной ГНСС-аппаратуры использовалась пара приемников Trimble R8 GNSS, паспортные характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Паспортные характеристики эталонной аппаратуры СГУГиТ

Фирма	Марка	СКО в статическом режиме	
		в плане	по высоте
Trimble	R8 GNSS	3 мм + 0,1 мм/км	3,5 мм + 0,4 мм/км

Собранные на пунктах ЭПБ ГНСС-измерения прошли математическую обработку в программном продукте Magnet Office Tools, по результатам которой определены четыре наклонных расстояния 1-2, 1-3, 1-4 и 1-5. В табл. 2 приведены результаты обработки в программном продукте Magnet Office Tools.

Таблица 2

Результаты обработки в программном продукте Magnet Office Tools

Линия	Длина, м	СКО в плане, м	СКО по высоте, м
1-2*	175,660	0,005	0,008
1-3*	307,389	0,002	0,004
1-4*	441,916	0,001	0,002
1-5*	507,566	0,003	0,005

* Эти значения в методике принимаются как измеренные.

Для контроля измеренные наклонные расстояния были сравнены с наклонными расстояниями, полученными электронным тахеометром LEICA TM30. В табл. 3 приведены результаты сравнения.

Таблица 3

Результаты сравнения измеренных наклонных дальностей, полученных ГНСС-приемниками и электронным тахеометром LEICA TM30

Линия	Разность, мм	Линия	Разность, мм
1-2	11	1-4	4
1-3	5	1-5	6

По результатам сравнения можно сделать следующий вывод. Измерения, полученные ГНСС-приемниками и электронным тахеометром LEICA TM30, хорошо согласуются между собой (за исключением линии 1-2), что говорит о качественно выполненных комплексных измерениях, а расхождения между спутниковыми измерениями и измерениями тахеометром могут быть объяснены различной паспортной точностью приборов и разными значениями уклонения отвесной линии на пунктах 1–5 эталонного линейного базиса.

Получение эталонных значений расстояний ЭЛБ осуществлялось в три этапа. На первом этапе выполнялась привязка исходного пункта 3, расположенного на борту русла реки, к координатной системе отсчета ITRF2014 на эпоху 2018.4361 относительным методом с использованием точных эфемерид. Привязка осуществлялась от трех пунктов Международной ГНСС-службы: ARTU (Екатеринбург), NRIL (Норильск) и IRKJ (Иркутск). На рис. 2 показана схема привязки пункта 3 к станциям Международной ГНСС-службы.

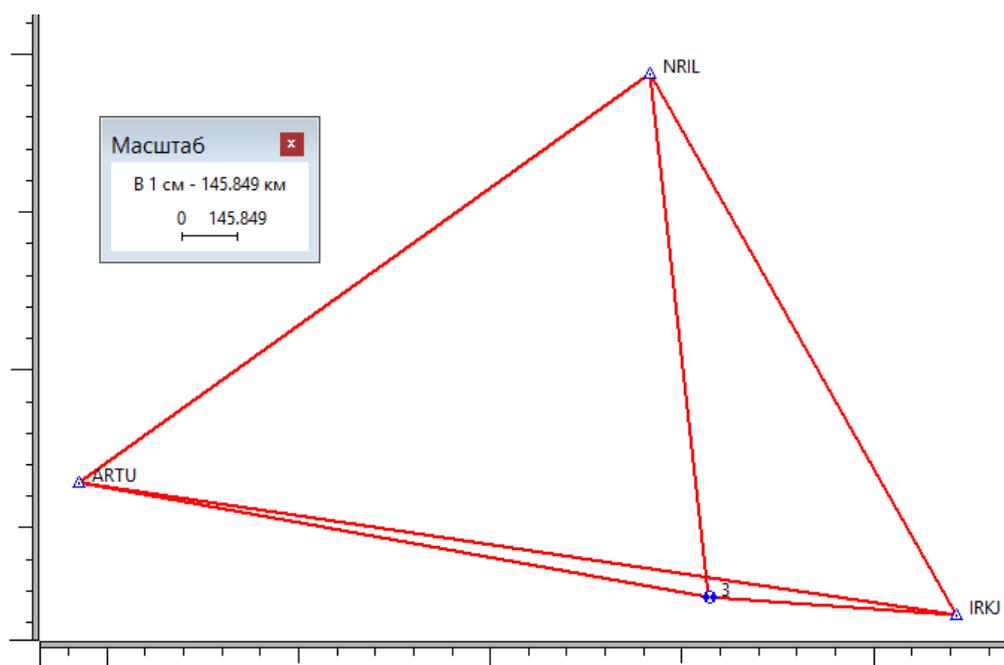


Рис. 2. Схема привязки пункта 3 к станциям Международной ГНСС-службы

Продолжительность сеансов ГНСС-измерений на точках ARTU, NRIL, IRKJ и 3 составляла 5 суток. По результатам обработки данных в программном продукте Magnet Office Tools были получены геоцентрические координаты пункта 3 со средней квадратической ошибкой 37 мм в плане и 42 мм по высоте.

На втором этапе выполнялось вычисление координат 7 точек мониторинга на гребне плотины, а также 2 пунктов, расположенных на бортах русла реки, в координатной системе отсчета ITRF2014. Для этого координаты пункта 3 были приняты за опорные, относительно которых определялись координаты других 9 пунктов (рис. 3).

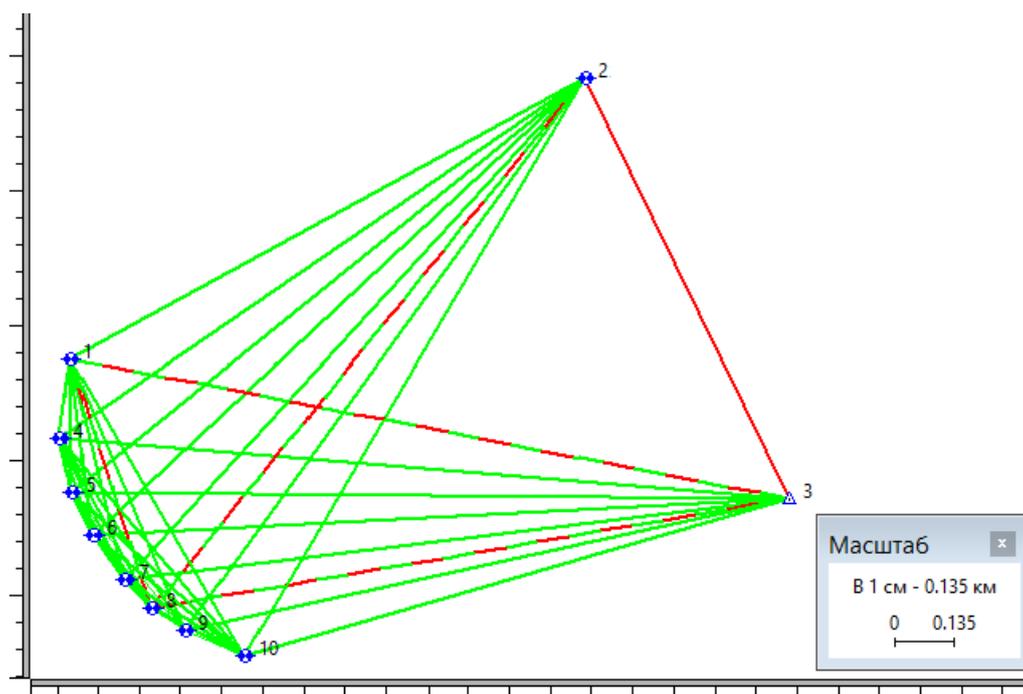


Рис. 3. Схема привязки пунктов системы мониторинга к координатной системе отсчета ITRF2014

Продолжительность сеансов ГНСС-измерений на всех 10 пунктах составляла 3 суток. При обработке данных в программном продукте Magnet Office Tools дополнительно в разряд оцениваемых параметров была введена влажная составляющая тропосферной задержки, так как высота гребня плотины, на которой установлено 7 точек мониторинга, и высота пункта 2, расположенного на борту русла реки, различаются приблизительно на 200 м.

По результатам минимально-ограниченного уравнивания были получены геоцентрические координаты 9 пунктов со средними квадратическими ошибками менее 1 мм в плане и 1 мм по высоте.

На третьем этапе определялись ошибки измерений базовых линий косвенным методом. Для этого каждый пункт эталонного линейного базиса привязывался к 10 пунктам системы мониторинга ГЭС, координаты которых выступали в качестве опорных (рис. 4).

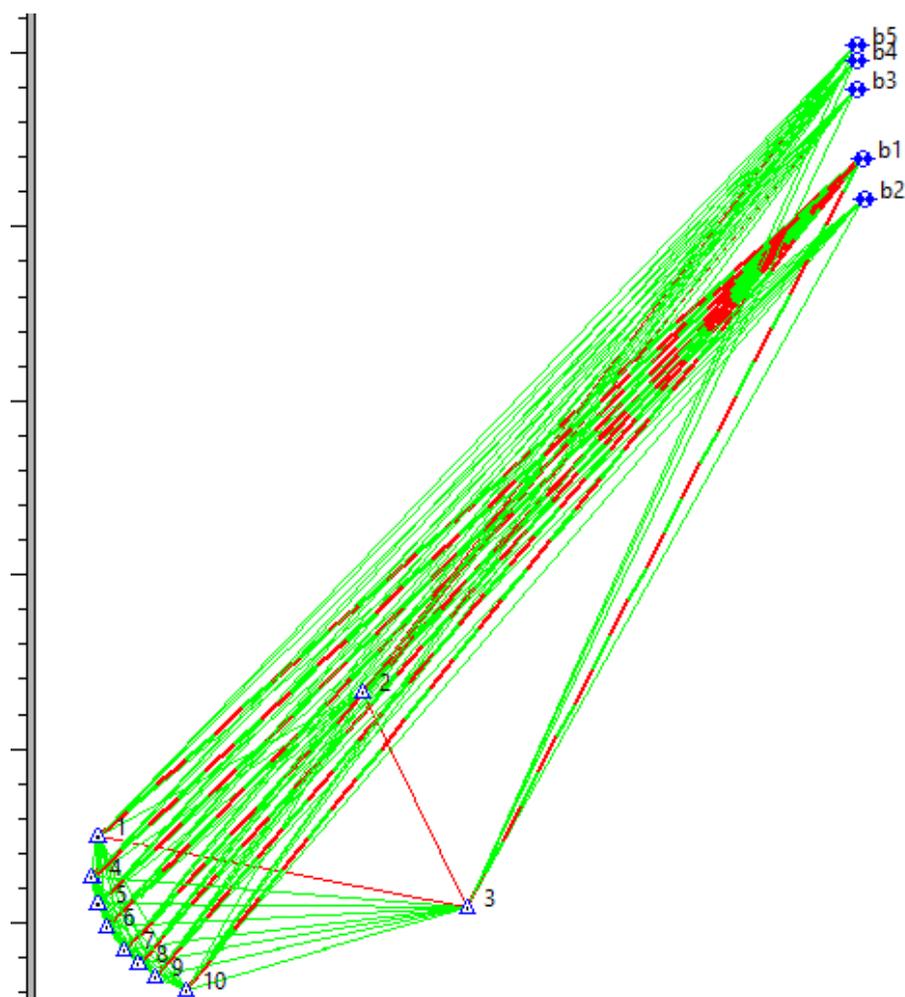


Рис. 4. Схема измерений базовых линий косвенным методом

При обработке данных не учитывалось перемещение 7 точек мониторинга в теле плотины, так как общее время совместных наблюдений на пунктах ГЭС и пунктах ЭЛБ составляло не более 1 часа, и величина перемещений этих семи пунктов пренебрежимо мала.

По результатам обработки в программном продукте Magnet Office Tools были определены геоцентрические координаты 5 пунктов ЭЛБ со средними квадратическими ошибками около 2 мм в плане и 3 мм по высоте. На основе уравнированных координат получены эталонные наклонные расстояния. После чего выполнено сравнение между вычисленными и эталонными значениями расстояний ЭЛБ, по результатам которого допустимые значения разностей не были превышены (табл. 4).

Таким образом, предложенная методика поверки ГНСС-приемников успешно апробирована на аппаратуре, установленной для деформационного мониторинга высоконапорной ГЭС в режиме реального времени, и может быть применена для метрологической поверки любых ГНСС-приемников, работающих в режиме слежения за уникальными зданиями и сооружениями.

Таблица 4

Результаты сравнений

Результаты сравнения линий	Разность длин линий (эталонное значение минус измеренное значение), м	Допуск, м
1-2	0,005	0,006
1-3	0,000	0,006
1-4	0,001	0,006
1-5	0,004	0,006

Заключение

В статье приведена методика метрологической поверки ГНСС-приемников в системах мониторинга деформаций уникальных зданий и сооружений. Предложенная в работе методика успешно апробирована на реальном уникальном объекте – высоконапорной ГЭС. По результатам метрологической поверки все 10 ГНСС-приемников, которые используются для мониторинга состояния высоконапорной ГЭС, соответствуют паспортным метрологическим характеристикам. Таким образом, методика метрологической поверки ГНСС-приемников, установленных в системах мониторинга деформаций технически сложных и уникальных сооружений, может применяться и на других подобных производственных объектах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестник СГГА. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.
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. Roberts G. W., Meng X., Dodson A. Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges // Journal of Surveying Engineering. – 2004. – Vol. 130 (2). – P. 65–72.
4. Cranenbroeck J. GNSS-technologies application for structural deformation monitoring // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 29–40.
5. Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurement / A. P. Karpik, N. S. Kosarev, K. M. Antonovich, I. G. Ganagina, V. Yu. Timofeev // Geodesy and Cartography. – 2018. – Vol. 44, Issue 4. – P. 140–145.
6. О надежности сетей постоянно действующих базовых станций / К. М. Антонович, И. Г. Ганагина, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 30–36.
7. Mazurova E. M., Kopeikin S. M., Karpik A. P. Development of a terrestrial reference frame in the Russian Federation // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2017. – Vol. 61 (4). – P. 616–638.
8. National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018 / M. D. Gerasimenko, V. L. Gorshkov, V. I. Kaftan, N. S. Kosarev, Z. M. Malkin, B. T. Mazurov, S. L. Pasynok, G. G. Pobedinsky, V. V. Popadev, V. P. Savinykh, R. A. Semyagin, N. V. Shestakov, G. M. Steblov, L. S. Sugaipova, A. V. Ustinov [Electronic resource] // Geoinf. Res. Papers. – 2019. – Vol. 7, No. 1, BS7003, GCRAS Publ., Moscow, 100 p. – Mode of access: <https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG>.

9. Об обеспечении единства измерений : федер. закон от 11.06.2008 № 102-ФЗ [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

10. ГОСТ Р 8.793–2012. Государственная система обеспечения единства измерений. Аппаратура спутниковая геодезическая. Методика поверки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293779/4293779721.pdf>.

11. Устинов А. В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 6. – С. 39–43.

Получено 16.10.2019

© А. П. Карпик, Н. С. Косарев, К. М. Антонович,
А. П. Решетов, А. В. Устинов, 2019

METHOD OF METROLOGICAL INSPECTION OF GNSS RECEIVERS OF A HIGH-CONNECTOR HEPS MONITORING SYSTEM

Alexander P. Karpik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Rector, phone: (383)343-39-37, e-mail: rectorat@ssga.ru

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

Konstantin M. Antonovich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Professor, Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

Aleksandr P. Reshetov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Head of Department Information and Technical Support, phone: (383)361-01-49, e-mail: trewizor@mail.ru

Alexander V. Ustinov

JSC "Institute Hydroproject", Volokolamsk Highway, 2, Moscow, 125993, Russia, Deputy Head of the Complex Research 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

The article presents a methodology for the metrological verification of GNSS receivers of a satellite geodesic monitoring system for a high-pressure hydroelectric station. The essence of the technique is as follows. At a distance of 3–10 km from the dam, a reference spatial basis is established, consisting of at least 5 points. Basis lines are measured by GNSS reference equipment. Then, in the static mode, the basis lines formed by the points of the basis and the verified equipment of the monitoring system are measured. A comparison is made between the calculated and reference values of distances and elevations of the spatial basis.

According to the results of the metrological verification of the GNSS receivers of the satellite geodetic monitoring system of a high-pressure hydroelectric station, the equipment errors within the

tolerance. The proposed method for the verification of GNSS receivers of a satellite monitoring system for a high-pressure hydroelectric station can be used for metrological verification of GNSS receivers in monitoring systems for deformations of unique buildings and structures, as well as in networks of permanent operating base stations.

Key words: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), metrological verification, verification technique, high-pressure hydroelectric power station, deformation monitoring, automated monitoring, reference space basis.

REFERENCES

1. Hiller, Bernd, & Jambaev, H. K. (2016). Development and natural tests of automated systems of deformation monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SUGGT]*, 1(33), 48–61 [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. Roberts, G. W., Meng, X., & Dodson, A. (2004). Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges. *Journal of Surveying Engineering*, 130(2), 65–72.
4. Cranenbroeck, J. (2012). GNSS-technologies application for structural deformation monitoring. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 17(1), 29–40 [in Russian].
5. 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*, 44(4), 140–145.
6. Antonovich, K. M., Ganagina, I. G., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2014). About network reliability of permanent base stations. *Izvestiya vusov. Geodeziya i aerofotosyemka. [Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, S/4, 30–36 [in Russian].
7. Mazurova, E. M., Kopeikin, S. M. & Karpik, A. P. (2017). Development of a terrestrial reference frame in the Russian Federation. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 61(4), 616–638.
8. Savinykh, V. P., Kaftan, V. I. (Eds.). (2019). National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018. *Geoinf. Res. Papers*, 7(1), BS7003. Moscow: GCRAS Publ, 100 p. Retrieved from <https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG>.
9. Federal Law of June 11, 2008 No. 102–FZ. On ensuring the uniformity of measurements. Retrieved from http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ [in Russian].
10. GOST R 8.793–2012. State system for ensuring the uniformity of measurements. Satellite geodetic equipment. Verification procedure. Retrieved from <https://meganorm.ru/Data2/1/4293779/4293779721.pdf> [in Russian].
11. Ustinov, A. V. (2014). Technology of satellite geodetic monitoring of hydropower structures. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*, 6, 39–43 [in Russian].

Received 16.10.2019

© A. P. Karpik, N. S. Kosarev, K. M. Antonovich,
A. P. Reshetov, A. V. Ustinov, 2019