

УДК 528:796

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-42-52

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТБОЛЬНЫХ СТАДИОНОВ ЧЕМПИОНАТА МИРА 2018

Николай Владимирович Канашин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кандидат технических наук, доцент, тел. (812)457-85-38, e-mail: nikolay_kanashin@mail.ru

Дмитрий Андреевич Афонин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кандидат технических наук, доцент, тел. (812)457-85-38, e-mail: afonin83@yandex.ru

Технологии геодезических работ при мониторинге различных сооружений, несмотря на исследования множества авторов, по-прежнему могут быть сопряжены с рядом трудностей, вызванных влиянием различных факторов. Целью статьи является изложение опыта выполнения геодезического мониторинга футбольных стадионов «Ростов Арена» и «Калининград» при сжатых сроках работ, необходимости высокой точности измерений и неблагоприятных для их выполнения условиях. Приведены два метода выполнения мониторинга – с созданием съемочной сети проложением ходов полигонометрии в сочетании со способом боковых пунктов и развитием ходов электронно-блочной тахеометрии. Изложены технология и особенности математической обработки измерений на каждом объекте. Приведены результаты рассмотренных методов, где показано, что применение способа боковых пунктов и электронно-блочной тахеометрии обеспечивает выполнение измерений с высокой точностью даже в неблагоприятных для наблюдений условиях. Изложены практические выводы и рекомендации. Статья может быть полезна специалистам в области мониторинга и геодезического контроля деформаций сооружений.

Ключевые слова: мониторинг сооружений, геодезические работы, контроль деформаций, плановые смещения, полигонометрия, электронно-блочная тахеометрия, повышение точности.

Введение

Геодезический мониторинг является необходимым этапом строительства и эксплуатации инженерных сооружений [1, 2]. Способы его выполнения на различных объектах достаточно полно исследованы и изложены в литературе [3–24], однако разнообразие условий наблюдений, требования к точности измерений, экономические причины и иные факторы могут приводить к затруднениям в геодезических работах. С такой ситуацией столкнулись сотрудники кафедры «Инженерная геодезия» Петербургского государственного университета путей сообщения при геодезическом мониторинге планового положения построенных к Чемпионату мира 2018 г. стадионов «Ростов Арена» и «Калининград», где объем и расположение контролируемых элементов сооружений, высо-

кие требования к точности измерений и сжатые сроки вынудили искать способы, позволяющие выполнять геодезический контроль в таких условиях без потерь в трудоемкости и экономической эффективности работ.

Стадион «Ростов Арена», рассчитанный на 43 472 зрительских места, расположен на левом берегу р. Дон в городе Ростов-на-Дону. Основными несущими конструкциями сооружения являются монолитный железобетонный каркас, состоящий из колонн, пилонов, стен, балок перекрытий и балок трибун, а также стальные конструкции покрытия. Фундамент свайный в виде монолитных железобетонных ростверков. Основными несущими элементами покрытия являются консоли, уравновешенные оттяжками. Кровля мембранная, подконструкция представляет арочную систему из круглых труб, жестко примыкающих к консоли. Для контроля планового положения

объекта пленочными отражателями закреплены 88 деформационных марок, 19 из которых закреплены на внешнем торце по периметру кровли, 23 – на ее опорных железобетонных

частях, 23 – на несущих металлоконструкциях кровли и остальные – на несущих железобетонных колоннах в уровне второго этажа по периметру сооружения (рис. 1).

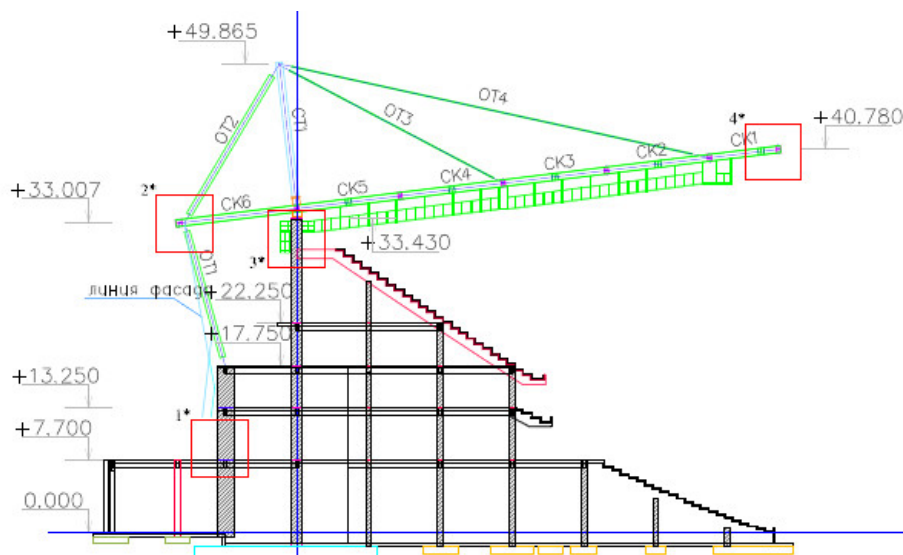


Рис. 1. Схема расположения контролируемых элементов на стадионе «Ростов Арена»:

1*–4* – контролируемые элементы, закрепленные деформационными марками

Футбольный стадион «Калининград» представляет собой четырехуровневое сооружение с тремя ярусами открытых трибун и рассчитан на 35 000 зрителей. Фундаментом сооружения на свайном основании, основными несущими конструкциями трибун и подтрибунных помещений является стальной каркас, состоящий из колонн, балок перекрытий, наклонных балок трибун, связей и диафрагм. Плановые деформационные марки закреплены пленочными отражателями на стальных опорных колоннах в количестве 100 штук. При этом 20 марок расположены в основании колонн снаружи стадиона, а остальные 80 – на верхних ярусах внутри него (рис. 2).

В соответствии с [2] на обоих объектах для выполнения работ были разработаны программы мониторинга, согласно которым средняя квадратическая погрешность измерения горизонтальных перемещений принята равной $m_s = 5$ мм. Учитывая, что перемещение представляет разность положений марки в циклах $i+1$ и i , исходя из принципа равных влияний вычислили среднюю квадратическую погрешность определения планового

положения марок m_{si} в каждом цикле наблюдений

$$m_S = \sqrt{m_{s_{i+1}}^2 + m_{s_i}^2} = m_{s_i} \sqrt{2};$$

$$m_{s_i} = \frac{m_S}{\sqrt{2}} = 3,5 \text{ мм}$$

и среднюю квадратическую погрешность определения координат марок m_x и m_y в каждом цикле наблюдений

$$m_{s_i} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2};$$

$$m_x = m_y = \frac{m_{s_i}}{\sqrt{2}} = 2,4 \text{ мм.}$$

Исходная геодезическая сеть, представленная четырьмя пунктами принудительного центрирования, на каждом стадионе имела свои особенности. Так, на стадионе «Калининград» оптическая видимость была обеспечена только между парами смежных пунктов, а на стадионе «Ростов Арена» она отсутствовала полностью при невозможности включения в общий состав наблюдений некоторых из них по различным причинам (ограничение доступа, дефекты создания и иные).

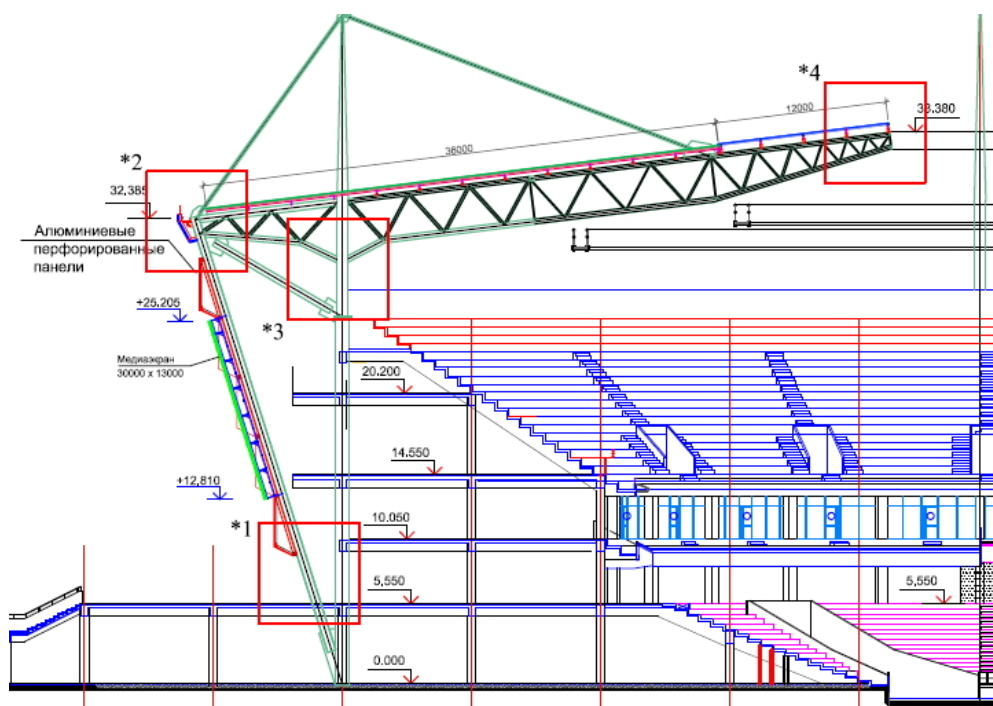


Рис. 2. Схема расположения контролируемых элементов на стадионе «Калининград»: 1*–4* – контролируемые элементы, закрепленные деформационными марками

Оптическая видимость с исходных пунктов на деформационные марки на объекте отсутствовала. Расположение марок как внутри, так и по внешнему периметру стадиона вынуждала создавать съемочную сеть единственным способом – проложением системы ходов полигонометрии, однако оно же не позволяло выполнять требование инструкции [25] для минимальной длины стороны хода вплоть до 2-го разряда включительно, что приводило к невозможности обеспечения точности наблюдений.

Методы и материалы

Геодезические работы на каждом объекте были выполнены разными исполнителями при использовании одного электронного тахеометра, имеющего априорную среднюю квадратическую погрешность измерения углов $m_{\beta} = 2''$ и относительную погрешность измерения длин линий $m_D = 2 \text{ мм} + 2 \text{ мм} \times 1 \text{ км}$ (на призму). Поэтому были применены различные способы создания съемочной сети, показанные ниже.

На стадионе «Ростов Арена» проложили систему ходов полигонометрии с использо-

ванием способа боковых пунктов, который заключается в добавлении в ход дополнительных точек и измерении с них или на них горизонтальных углов и расстояний до основных пунктов (рис. 3).

Данный прием известен в литературе [26], где указано, что он позволяет получить надежный контроль измерений в ходе полигонометрии, однако степень его эффекта не раскрывается. В качестве боковых пунктов использовали деформационные марки и исходные пункты, непосредственно измеряя расстояния до них с пункта наблюдения (расстояние d_2 на рис. 3), и косвенно как недоступные – со смежных точек хода (расстояния d_1 и d_3 на рис. 3). Кроме того, также косвенным путем были измерены расстояния между боковыми пунктами, а также между смежными точками хода (рис. 4).

Измерения горизонтальных углов при создании съемочной сети выполнены двумя приемами с одновременным измерением длин сторон хода. Предварительные координаты деформационных марок определены одновременно с проложением ходов полярной засечкой при двух положениях вертикального круга инструмента.

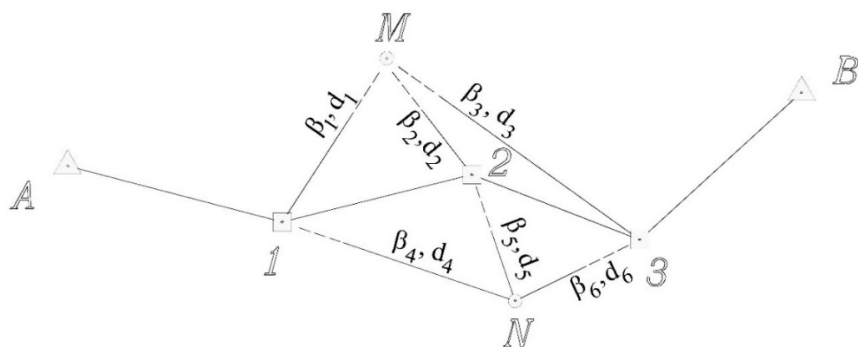


Рис. 3. Схема хода полигонометрии с боковыми пунктами:
 A, B – исходные пункты; 1–3 – пункты хода; M, N – боковые пункты; β_1 – β_6 – измеренные горизонтальные направления; d_1 – d_6 – измеренные горизонтальные проложения

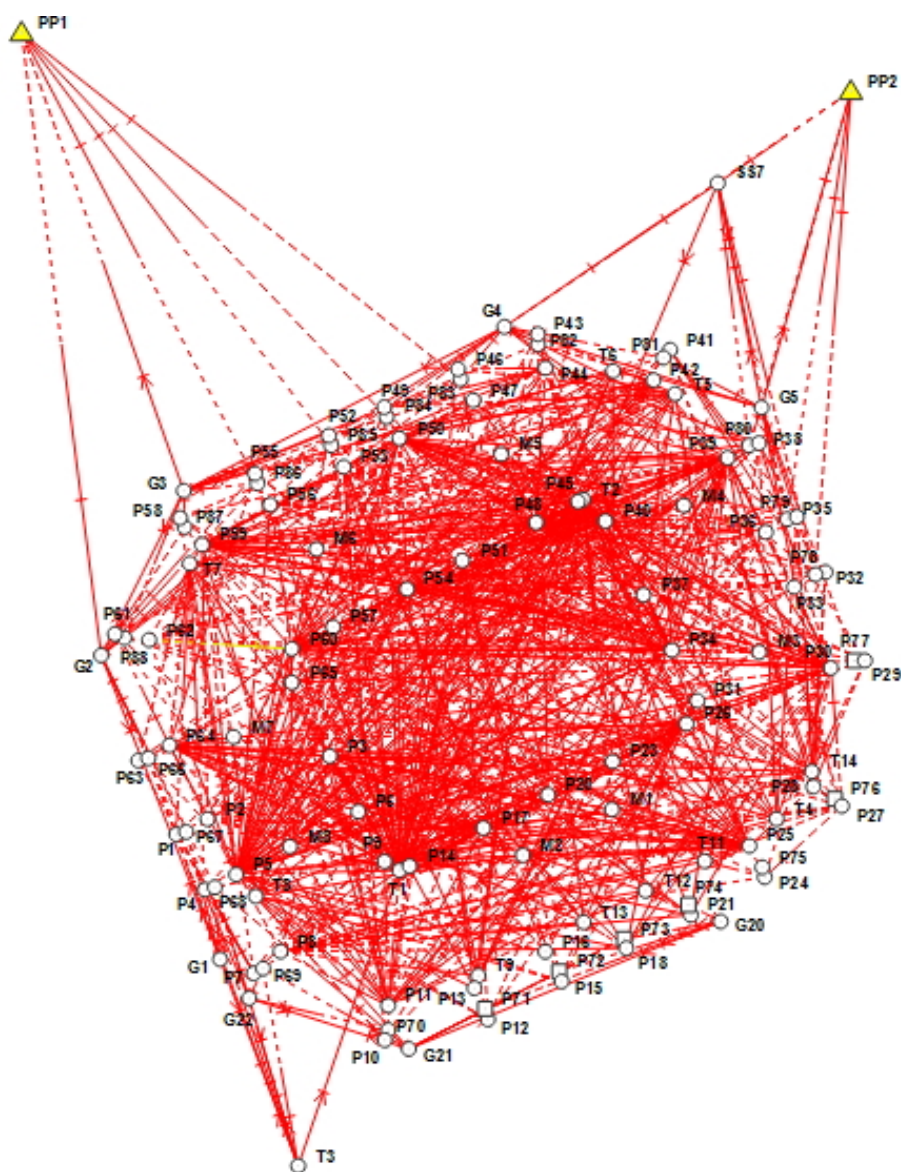


Рис. 4. Схема плановой съемочной сети при геодезическом мониторинге стадиона «Ростов Арена»:

P1 – P88 – деформационные марки; PP1 – PP2 – исходные пункты

На стадионе «Калининград» с целью сокращения трудоемкости работ воспользовались технологией электронной блочной тахеометрии, применение которой при выполнении различных работ также изложено в литературе [27].

Полевые работы выполнялись поэтапно. На первом этапе для наблюдения расположенных по периметру внешнего контура стадиона деформационных марок проложили замкнутый ход электронно-блочной та-

хеометрии. Линейно-угловые наблюдения выполнили одним приемом на все пункты. Станции и связующие точки выбирались таким образом, чтобы с одной станции было видно не менее двух связующих точек с предыдущей станции и две деформационные марки, при этом одна из деформационных марок одновременно является и связующей точкой, а одна из связующих точек является общей сразу для трех смежных станций (рис. 5).

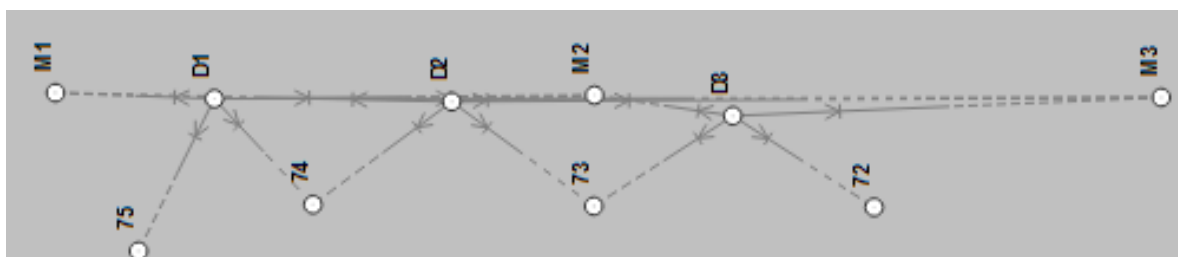


Рис. 5. Пример участка электронно-блочной тахеометрии

Так, на станции $D1$ выполнены наблюдения на марки 74-75 и связующие точки $M1$ и $M2$, а на следующей станции $D2$ – на деформационные марки 74 и 73, где марка 74 выступает связующей со станцией $D1$, и три связующие точки $M1$, $M2$ и $M3$, где точка $M3$ определена для связи с последующими станциями. На станции $D3$ выполнены наблюдения на деформационные марки 73 и 72, при этом марка 73 выступает связующей со станцией $D2$ и двумя связующими точками $M2$, $M3$ и т. д.

В качестве связующих точек M использовали два комплекта отражательных систем, состоящих из призмного отражателя и трегера, которые устанавливались на бетонный парапет, при этом контур трегера обводили маркером с целью исключения погрешностей за центрировку и редукцию при необходимости повторной установки марки.

На втором этапе работ осуществили привязку хода электронно-блочной тахеометрии к исходным пунктам, выполнив наблюдения с них на видимые деформационные марки и связующие точки.

На третьем этапе работ между точками M , расположенными по диагонали стадиона, был проложен разомкнутый ход полигонометрии с одновременным наблюдением во внутренней части сооружения шести вспомогательных пунктов съемочной сети, закрепленных пленочными отражателями на бетонных поверхностях несущих конструкций. Наблюдения в ходе выполнили двумя приемами. Расположение вспомогательных пунктов обеспечивало благоприятные условия выполнения многократной линейно-угловой засечки со свободных станций в разных местах внутренней части стадиона.

На завершающем четвертом этапе методом свободного stationирования относительно вспомогательных пунктов полярной засечкой определили плановое положение деформационных марок внутри стадиона, при этом каждая марка наблюдалась не менее чем с двух станций (рис. 6) с одновременным измерением расстояний между ними по методике, изложенной в работе [28].

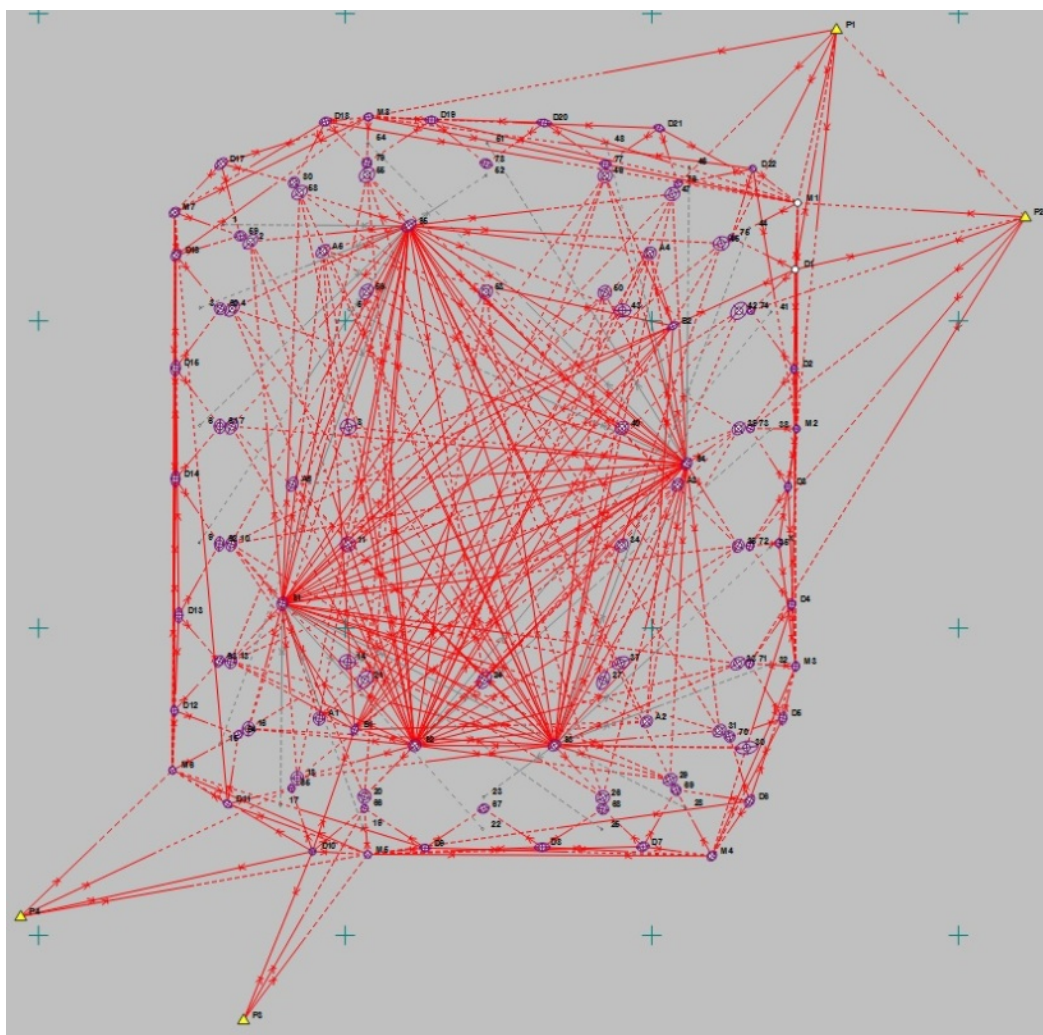


Рис. 6. Схема плановой съемочной сети при геодезическом мониторинге стадиона «Калининград»

Математическую обработку измерений на объектах выполнили в системе CREDO DAT 5.1. Исходя из априорных значений средних квадратических погрешностей, измеренным косвенным образом недоступным расстояниям вычисляли индивидуальные средние квадратические погрешности с целью пони-

жения веса таких измерений по известной формуле оценки точности функций измеренных величин. Наиболее детально вопрос точности измерения недоступных расстояний электронным тахеометром исследован в работе [29], где выведена формула расчета их средней квадратической погрешности

$$m_d = \sqrt{\left(\frac{d_1 - d_2 \cdot \cos \beta}{d}\right)^2 \cdot m_s^2 + \left(\frac{d_2 - d_1 \cdot \cos \beta}{d}\right)^2 \cdot m_s^2 + \left(\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot \sin \beta}{d}\right)^2 \cdot \frac{m_\beta^2}{\rho^2}},$$

где m_d – средняя квадратическая погрешность измерения недоступного расстояния; m_s – априорная средняя квадратическая погрешность линейных измерений; m_β – средняя квадратическая погрешность угловых

измерений; ρ – число секунд в радиане, равное 206 265; d_1 и d_2 – непосредственно измеренные расстояния до точек, между которыми определяется недоступное расстояние.

После уравнивания измерений выполняли анализ поправок с целью выявления грубых

погрешностей или некачественных измерений. Теоретические основы корректности такого подхода доказаны в работе [30], где показано, что грубая погрешность допущена в таком измерении, где величина поправки δ превышает его предельную погрешность

$$\delta > \Delta = tm,$$

где Δ – предельная погрешность; t – коэффициент доверительной вероятности; m – априорное значение средней квадратической погрешности.

Заметим, что некачественными измерениями считали такие, где величины поправок близки к предельной погрешности, но не превышают ее. Учитывая существенную избыточность измерений на обоих объектах, такие наблюдения исключали из обработки с повторным уравниванием всей сети.

Результаты

Изложенные выше способы наблюдений позволили включить в съемочную сеть все деформационные марки и получить оценку точности измерений на каждую из них. По результатам их математической обработки средние квадратические погрешности определения координат марок на каждом объекте не превысили допустимых значений 2,4 мм, что позволяет сделать вывод об эффективно-

сти обоих рассмотренных методов мониторинга в условиях необходимости обеспечения высокой точности наблюдений и сжатости сроков работ.

Для оценки эффективности способа боковых пунктов при математической обработке измерений на стадионе «Ростов Арена» выполнили два варианта уравнивания – с включением боковых пунктов в съемочную сеть и без таких пунктов. Это позволило опытным путем установить, что применение боковых пунктов при проложении ходов полигонометрии повышает точность определения координат съемочной сети в 1,5–2 раза. При этом основное влияние на нее оказывают измерения, выполненные с точек хода полигонометрии на боковые пункты, и в меньшей степени – измерения, связывающие смежные из них.

Заключение

Безусловно, изложенные методы мониторинга не являются единственно возможными при работе в приведенных выше условиях и не лишены ряда недостатков, главным из которых является увеличение трудоемкости полевых и камеральных работ в сравнении с традиционными методами измерений. Однако при должной квалификации исполнителей эта величина несущественна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 3.01.03–84: свод правил СП 126.13330.2012. Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция. – М., 2011. – 77 с.
2. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М., 2011. – 54 с.
3. Олейник А. М. Организация системы геодезического мониторинга объектов нефтегазового комплекса в криолитозоне // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография и маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 166–170.
4. Лазарев В. М. Система геодезического обеспечения мониторинга оползневых процессов на территории города Томска // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография и маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 77–83.
5. Ямбаев Х. К., Яценко В. Р. Геодезический мониторинг движений земной коры: состояние, возможности, перспектива // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография и маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 3. – С. 139–155.
6. Середович В. А., Середович А. В. Геодезический мониторинг деформаций Усть-Каменогорского судоходного шлюза // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография и маркшейдерия» : сб. матери-

- алов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 3. – С. 127–133.
7. Геодезическое обеспечение геодинамического мониторинга объектов недропользования / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, А. Н. Панжина, Б. Т. Мазуров // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (34). – С. 26–39.
8. Богомолова Н. Н. Методика мониторинга тоннелей на основе комплексного применения геодезических средств измерений и методов статистического анализа // Записки горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 40–45.
9. Устинов А. В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 6. – С. 39–43.
10. Информационная система геодезического мониторинга деформаций транспортных сооружений / М. Я. Брынь, А. А. Никитчин, В. В. Федянин, А. Д. Хомоненко // Наука и транспорт. – 2013. – № 2. – С. 58–60.
11. Ознамец В. В., Дегбенъон О. П. А. Геодезическое обеспечение мониторинга береговой линии (на примере берега Атлантического океана Республики Бенин) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – № 3. – С. 249–256.
12. 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.
13. Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС / В. Г. Сальников, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, Т. А. Хлебникова // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 108–124.
14. Kontogianni V. Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring // Engineering Geology. – 2005. – Vol. 79, Issues 1-2. – P. 115–126.
15. New integrated geodetic monitoring system at Stromboli volcano (Italy) / G. Puglisi, A. Bonaccorso, M. Mattia, M. Aloisi, A. Bonforte, O. Campisi, M. Cantarero, G. Falzone, B. Puglisi, M. Rossi // Engineering Geology. – 2005. – Vol. 79, Issues 1-2. – P. 13–31.
16. Geodetic monitoring and geotechnical analyses of subsidence induced settlements of historic structures / C. Castagnetti, R. Cosentini, R. Lancellotta, A. Capra // Structural Control and Health Monitoring. – 2017. – Vol. 24, Issue 12. – P. 42–49.
17. Geodetic monitoring of the subsidence in the Po River Delta (Italy) / N. Cenni, M. Fabris, S. Fiaschi, V. Achilli, M. Floris, A. Menin, M. Monego, P. Riccardi // Geophysical Research Abstracts. – 2019. – Vol. 21. – P. 1–11.
18. Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application / M. Kutykadamov, K. Rysbekov, I. Milev, K. Ystykul, B. Bektur // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2016. – Vol. 93. – P. 24–31.
19. Nazirov J., Davlatshoev S., Kozlov D. Geodetic Monitoring of Large-Span Underground Facilities During Construction of the Rogun Hydroelectric Power Station // Power Technology and Engineering. – 2018. – Vol. 52. – P. 400–404.
20. Горохова Е. И. Геомониторинг инженерных сооружений и прогнозирование их деформаций по данным лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 65–72.
21. Маркузе Ю. И., Куонг Л. А. Исследование алгоритма для анализа деформаций геодезических пунктов при наблюдении за горизонтальными смещениями гидротехнических сооружений // Геодезия и картография. – 2017. – № 7. – С. 23–30.
22. Мониторинг деформационных процессов природного происхождения при изыскательских работах на площадке АЭС / О. Н. Галаганов, Т. В. Гусева, И. С. Крупенникова, А. Н. Мокрова, Н. К. Розенберг // Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 2 (31). – С. 15–23.
23. Брынь М. Я., Никитчин А. А., Толстов Е. Г. Геодезический мониторинг объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта спутниковыми методами // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 4 (29). – С. 58–60.
24. Брынь М. Я., Толстов Е. Г., Богомолова Н. Н. Геодезические наблюдения за деформациями сооружаемых тоннелей // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 9. – С. 16–19.
25. Инструкция по полигонометрии и трилатерации. – М. : Недра, 1976. – 104 с.
26. Асур В. Л., Кутузов М. Н., Муравин М. М. Высшая геодезия. – Изд. 2, перераб. и доп. – М. : Недра, 1979. – 398 с.
27. Вальков В. А. Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования: дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2015. – 146 с.
28. Канашин Н. В., Никитчин А. А. Геодезический мониторинг строительства стадиона «Спартак» в г. Москве // Геопрофи. – 2014. – № 3. – С. 8–11.
29. Афонин Д. А. Построение геодезической разбивочной сети, закрепляемой пленочными отражателями // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 301–308.

30. Коугия В. А. Избранные труды : монография / под ред. М. Я. Брыня – СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2012. – 448 с.

Получено 25.05.2020

© Н. В. Канашин, Д. А. Афонин, 2020

GEODETIC MONITORING DURING THE OPERATION THE FOOTBALL STADIUMS OF THE WORLD CHAMPIONSHIP 2018

Nikolay V. Kanashin

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 190031, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (812)457-85-38, e-mail: nikolay_kanashin@mail.ru.

Dmitry A. Afonin

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 190031, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (812)457-85-38, e-mail: afonin83@yandex.ru

The technologies of geodetic works in monitoring of various structures can still be associated with a number of difficulties caused by the influence of different factors despite the studies of many authors on that theme. The article describes the high accuracy geodetic monitoring of the football stadiums "Rostov Arena" and "Kaliningrad" that took place in a short time frame and in adverse weather conditions. The article gives two geodetic monitoring methods such as creating serving network by side-points method and electronic block tacheometry. The technology and the adjustment of measurements made during monitoring are described in the article. The results show that the use of the side-points method and electronic block tacheometry ensures high accuracy measurements even in adverse conditions for observations. Practical conclusions and recommendations are set out. The article may be useful for specialists in the field of monitoring and geodetic control of deformations of structures.

Key words: geodetic monitoring, deformation control, horizontal displacements, polygonometry, electronic block tacheometry, accuracy increase.

REFERENCES

1. Construction Rules and Regulations. Code of practice SP 126.13330.2012. (2011). Geodetic works in construction. Updated edition]. Moscow: Ministry of Regional Development [in Russian].
2. Standarts Russian Federation. (2014). GOST 31937-2011. Buildings and constructions. Rules for inspection and monitoring of technical condition. Moscow: Ministry of Regional Development [in Russian].
3. Oleynik, A. M. (2012). Organization of a geodetic monitoring system for oil and gas facilities in the permafrost zone. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya i marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography and Mine Surveying]* (pp. 166–170). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
4. Lazarev, V. M. (2012). The system of geodetic support for monitoring landslide processes in the city of Tomsk. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya i marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography and Mine Surveying]* (pp. 77–83). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
5. Yambaev, Kh. K., & Yashchenko, V. R. (2012). Geodetic monitoring of movements of the earth's crust: state, capabilities, perspective. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya i marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography and Mine Surveying]* (pp 139–155). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

6. Seredovich, V. A., & Seredovich, A. V. (2012). Geodetic monitoring of deformations of the Ust-Kamenogorsk shipping lock In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya i marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography and Mine Surveying]* (pp. 127–133). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
7. Panzhin, A. A. Sashurin, A. D., Panzhina, A. N., & Mazurov, B. T. (2016). Geodetic support of geodynamic monitoring of subsoil use objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(34), 26–39 [in Russian].
8. Bogomolova, N. N. (2013). Tunnel monitoring technique based on the integrated use of geodetic measuring instruments and statistical analysis methods. *Zapiski gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 204, 40–45 [in Russian].
9. Ustinov, A.V. (2014). Technology of satellite geodetic monitoring of hydraulic structures. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]*, 6, 39–43 [in Russian].
10. Bryn', M. Ya., Nikitchin, A. A., Fedyanin, V. V., & Khomonenko, A. D. (2013). Information system for geodetic monitoring of deformations of transport structures *Nauka i transport. [Science and Transport]*, 2, 58–60 [in Russian].
11. Oznamets, V. V., & Degben'on, O. P. A. (2018). Geodetic support for monitoring the coastline (on the example of the Atlantic coast of the Republic of Benin). *Izvestiya vusov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vusov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 249–256 [in Russian].
12. Sholomitskiy, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2016). High-precision geodetic measurements in deformation monitoring of the water park. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 45–59 [in Russian].
13. Sal'nikov, V. G., Skripnikov, V. A., Skripnikova, M. A., & Khlebnikova, T. A. (2018). The use of modern automated geodetic instruments for monitoring hydraulic structures of hydroelectric power plants. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 108–124 [in Russian].
14. Kontogianni, V. (2005). Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring. *Engineering Geology*, 79(1-2), 115–126.
15. Puglisi, G., Bo-naccorso, A., Mattia, M., Aloisi, M., Bonforte, A., Campisi, O., Cantarero, M., Falzone, G., Puglisi, B., & Rossi, M. (2005). New integrated geodetic monitoring system at Stromboli volcano (Italy). *Engineering Geology*, 79(1-2), 13–31.
16. Castagnetti, C., Cosentini, R., Lancellotta, R., & Capra, A. (2017). Geodetic monitoring and geotechnical analyses of subsidence induced settlements of historic structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(12), 42–49.
17. Cenni, N., Fabris, M., Fiaschi, S., Achilli, V., Floris, M., Menin, A., Monego, M. & Riccardi, P. (2019). Geodetic monitoring of the subsidence in the Po River Delta (Italy). *Geophysical Research Abstracts*, 21, 1–11.
18. Kuttykadamov, M., Rysbekov, K., Milev, I., Ystykul, K., & Bektur, B. (2016). Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 93, 24–31.
19. Nazirov, J., Davlatshoev, S., & Kozlov, D. (2018). Geodetic Monitoring of Large-Span Underground Facilities During Construction of the Rogun Hydroelectric Power Station. *Power Technology and Engineering*, 52, 400–404.
20. Gorokhova, E. I. (2016). Geomonitoring of engineering structures and forecasting their deformations using laser scanning data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 65–72 [in Russian].
21. Markuze, Yu. I., & Kuong, L. A. (2017). The study of the algorithm for the analysis of deformations of geodetic points when observing the horizontal displacements of hydraulic structures. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 7, 23–30 [in Russian].
22. Galaganov, O. N., Guseva, T. V., Krupennikova, I. S., Mokrova, A. N., & Rozenberg, N. K. (2017). Monitoring of deformation processes of natural origin during survey work at the NPP site. *Monitoring. Nauka i tekhnologii [Monitoring. Science and Technology]*, 2(31), 15–23 [in Russian].
23. Bryn', M. Ya., Nikitchin, A. A., & Tolstov, E. G. (2010). Geodetic monitoring of railway transport infrastructure facilities by satellite methods. *Transport rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 4(29), 58–60 [in Russian].
24. Bryn', M. Ya., Tolstov, E. G., & Bogomolova, N. N. (2013). Geodetic observations of deformations of tunnels under construction. *Put' i putevoe khozyaystvo [Path and Track Facilities]*, 9, 16–19 [in Russian].
25. *Instruktsiya po poligonometrii i trilateratsii [Polygonometry and trilateration instructions]*. (1976). Moscow: Nedra Publ., 104 p. [in Russian].
26. Asur, V. L., Kutuzov, M. N., & Muravin, M. M. (1979). *Vysshaya geodeziya [The higher geodesy]*. Moscow: Nedra Publ., 398 p. [in Russian].
27. Val'kov, V. A. (2015). Geodetic survey of the high-rise structures deformation using terrestrial

laser scanning technology. *Candidate's thesis*. Sankt-Peterburg, 146 p. [in Russian].

28. Kanashin, N. V., & Nikitchin, A. A. (2014). Geodetic monitoring of the construction of the Spartak Stadium in Moscow. *Geoprofi [Geoprofi]*, 3, 8–11 [in Russian].

29. Afonin, D. A. (2012). Construction of a geodetic alignment network fixed by film reflectors.

Zapiski gornogo instituta [Journal of Mining Institute], 199, 301–308 [in Russian].

30. Kougiya, V. A. (2012). *Izbrannye trudy [Selected works]*. M. Ya. Bryn' (Ed). Saint Petersburg: Petersburg State University of Railway Engineering Publ., 448 p. [in Russian].

Received 25.05.2020

© N. V. Kanashin, D. A. Afonin, 2020