

УДК 528.482

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-117-126

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ

*Андрей Аркадьевич Шоломицкий*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: sholomitskij@mail.ru

*Бахтиер Назруллоевич Ахмедов*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (953)873-09-06, e-mail: khudobakhsh@inbox.ru

В статье приводятся оценка результатов геодезических измерений и выводы, полученные при наблюдении за деформациями во время строительства и эксплуатации большепролетного сооружения с перекрытием типа «пространственная оболочка», находящегося на территории с опасными природными и сейсмическими процессами и жарким климатом. На основании результатов измерений вертикальной и горизонтальной составляющих деформации выполнен анализ реального поведения конструкций в этих условиях. Оценивая деформации на разных стадиях и параметры окружающей среды, можно установить решающие параметры и допуски для поведения реальной пространственной металлической конструкции. Приведены данные измерений трех циклов наблюдений при строительстве объекта и трех циклов после его ввода в эксплуатацию, на основании которых сделан вывод, что конструкция испытывает небольшие закономерные деформации, которые соответствуют расчетным.

**Ключевые слова:** пространственная конструкция, мониторинг, деформации, геодезические измерения, большепролетное сооружение, нагрузка, расчетная модель, нагрузка, параметры среды.

### *Введение*

Металл является традиционным материалом, из которого строятся конструкции большепролетных сооружений. Металлические конструкции имеют высокую прочность, легко монтируются и имеют современный эстетический вид. В настоящее время строительная индустрия все чаще использует конструкции перекрытий из металла [1–6] для строительства пространственных конструкций сложной геометрической формы. Возведение сооружений с металлической конструкцией все шире применяется в зонах повышенной сейсмичности.

Несмотря на особые технические условия для возведения сооружений с пространственной металлической конструкцией в зонах повышенной сейсмичности, большепролетные сооружения строятся очень высоки-

ми темпами и являются важными объектами инфраструктуры каждой развивающейся страны. Такая тенденция характерна и для стран Центральной Азии. В Таджикистане возведено несколько таких сооружений с разными конструктивными решениями. Например, Дворец водных видов спорта, построенный по системе пространственной модульной конструкции (рис. 1).

Использование новых архитектурных и строительных технологий повышает необходимость обратной связи в виде периодических геодезических измерений, во время строительства и эксплуатации для проверки их фактического поведения в заданных условиях. Полученные данные могут быть использованы для уточнения расчетных моделей и оптимизации проектирования новых сооружений со сходными конструкциями [7, 8].



Рис. 1. Перекрытие дворца водных видов спорта в г. Душанбе

### *Общая информация об объекте*

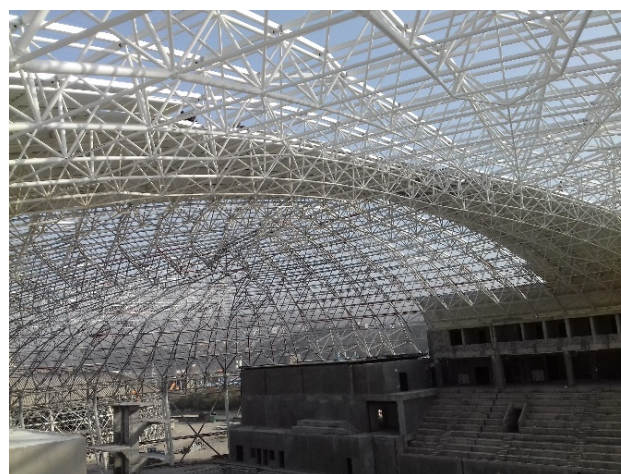
Строительство металлической конструкции Дворца водных видов спорта на 2 000 посадочных мест на улице Карамова города Душанбе началось в марте 2017 г., монтаж модульной конструкции оболочки завершился в декабре 2017 г. Еще в течение года продолжались работы по монтажу витражей,

устройству кровли, инженерных коммуникаций и других работ. В конце 2018 г. завершились все работы повышающие нагрузки на несущие конструкции оболочки.

С мая 2019 г. сооружение сдано в эксплуатацию. Пример конструкции во время строительства (рис. 2, а) и вид готовой смонтированной модульной конструкции показан на рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2. Общий вид металлической модульной конструкции:  
а) в процессе монтажа; б) готовая смонтированная конструкция оболочки

Сооружение имеет форму эллипса в плане размером 118,94 м на 93,94 м. Основная конструкция, поддерживающая кровельную систему, состоит из пространственной металлической конструкции – оболочки, стоящей

на металлических колоннах высотой 28,30 м. Арки в поперечном и продольном направлениях усилены продольными и боковыми связями, и весь каркас создает пространственную несущую систему – пространственную

оболочку. Несущая конструкция оболочки крепится к железобетонным фундаментам с помощью шарнирных опор. Монтаж конструкции оболочки был выполнен с высокой точностью (фактическое отклонение в плане от проекта не превышало 12 мм, а вертикальное – 20 мм).

С целью проведения мониторинга для определения фактического поведения той или иной пространственной конструкции используются геодезические методы измерения [9–15], зачастую в совокупности с различными датчиками. Современная литература по системам автоматизированного мониторинга очень обширна и в рамках одной статьи ее осветить затруднительно, поэтому авторы только обозначили основные направления. Технические регламенты для строительства и эксплуатации зданий и сооруже-

ний требуют систематического измерения перемещений и деформаций [16] при строительстве и при эксплуатации объектов. Целесообразно выполнять регулярное проведение измерений деформационных явлений в соответствующих интервалах – циклах измерений или эпохах измерений.

Деформационные марки для мониторинга устанавливаются при тесном взаимодействии с конструкторами-проектировщиками в местах ожидаемых максимальных сосредоточенных деформаций.

Согласно расчетной модели, деформации происходят в основном в центральной части покрытия (рис. 3, а, зона окрашена красным цветом), а при сейсмическом воздействии и перемещении узлов в боковых частях (рис. 3, б). Максимальная величина деформации по расчету 266 мм (рис. 3).

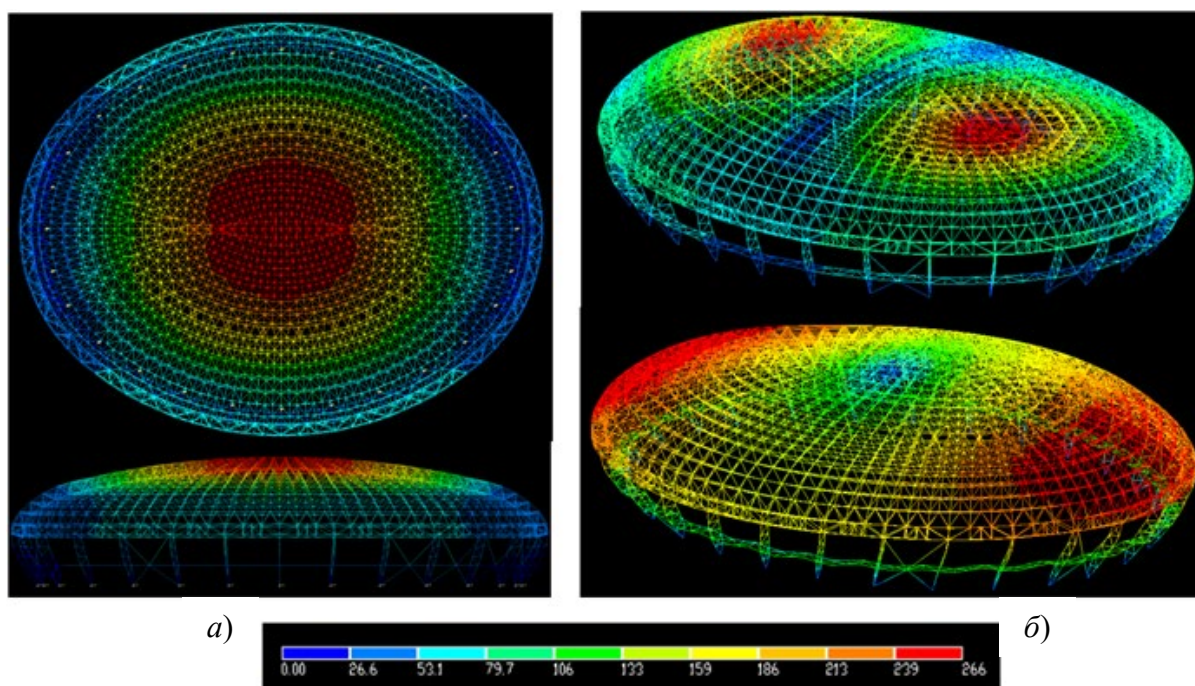


Рис. 3. Расчетная модель деформации конструкции:  
 а) в статических условиях; б) при сейсмических воздействиях

**Технологическая схема проведения мониторинга деформаций большепролетных сооружений**

После завершения строительства геометрические параметры конструкции постепенно изменяются из-за резьбовых соединений

узлов (шарнирных узлов). Другими важными факторами, влияющими на деформацию, являются погодные условия, особенно влияние температуры и влажности, сейсмические, а также сезонные воздействия. Из-за инсоляции алюминиевая конструкция крыши нагревается, и это приводит к удлинению стрелы

и откручиванию в узлах соединений металлической конструкции. Сооружение находится в зоне с жарким летним климатом и большим перепадом температур зимой, подвергается атмосферным воздействиям, снеговой и ветровой нагрузкам. Температура воздуха внутри поддерживается системой кондиционирования  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , летом снаружи поднимется до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зимой падает до  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

С момента полного завершения монтажа металлической конструкции периодически проводятся наблюдения за смещениями и деформациями. С 2018 г. выполнено 6 циклов

измерений, 3 из них были проведены во время строительства, при возрастании нагрузки на металлический каркас.

Поведение наблюдаемой конструкции оболочки оценивается на основе результатов геодезических измерений по установленным маркам на нижних поясах конструкции крыши. С целью проведения мониторинга за перемещениями и деформациями, во время изготовления металлоконструкции на заводе были сделаны отверстия для закрепления геодезических деформационных марок на нижних шарах оболочки (рис. 4).

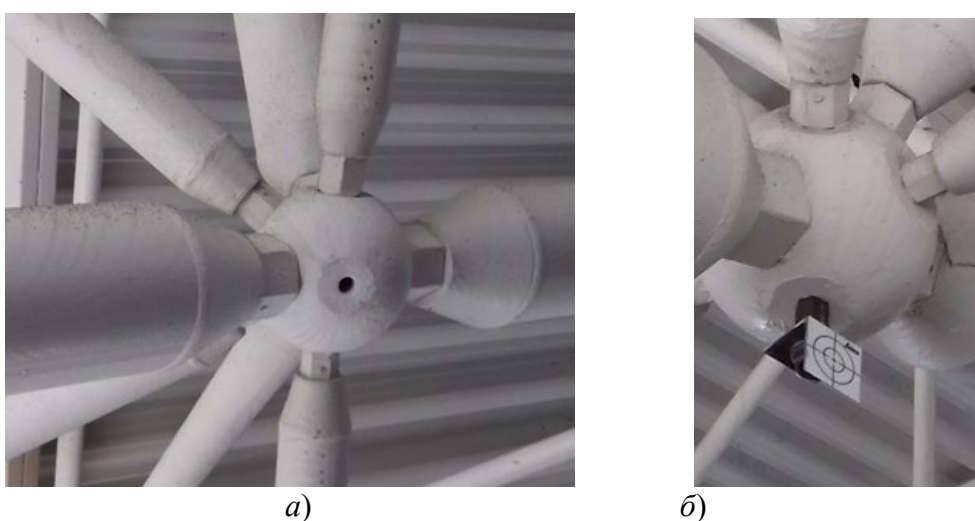


Рис. 4. Конструкция геодезической марки:

а) металлический шар с отверстием; б) установленная геодезическая марка

Эти марки помогли провести измерения и создать исполнительные схемы, определить отклонения от проектного положения и дать оценку качеству монтажных работ.

Вся конструкция состоит из 1 250 шаров на нижнем поясе, на 57 из них симметрично установлены измерительные марки. Сеть геодезических пунктов по внутреннему контуру и деформационных марок для наблюдения за перекрытием, их расположение в плане показаны на рис. 5. Геодезическая сеть состоит из 8 пунктов, расположенных на бетонном покрытии вспомогательных помещений внутри спортивного зала.

Технология мониторинга основана на методе измерений тахеометром линейно-угловой сети с трех и более свободных станций.

Геодезические марки обозначены порядковыми номерами от 1 до 57, а опорные геодезические пункты – буквой *R*. Точки, откуда обеспечивается видимость на деформационные марки перекрытия, обозначены знаками геодезических станций и нумерацией I, II, III.

Для выполнения измерений используется условная система координат, в которой ось *X* параллельна продольной оси сооружения, ось *Y* перпендикулярна ей. Путем сравнения координат полученных в разные циклы, можно оценить деформации в продольном, поперечном и вертикальном направлениях.

На рис. 6 и 7 показаны профили по главным сечениям сооружения: продольный профиль по линии марок 29 – 1 (см. рис. 6) и поперечный, по линии марок 45 – 17.

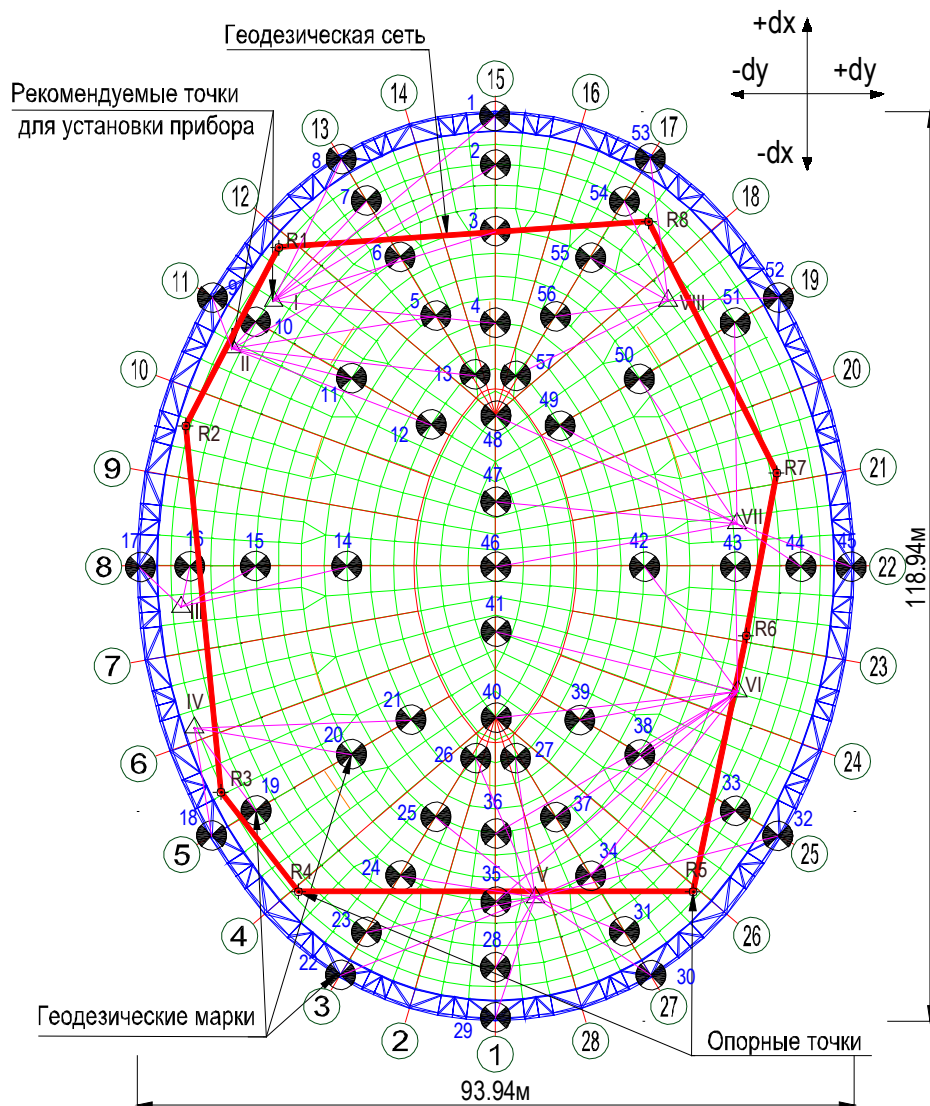


Рис. 5. Схема расположения геодезических марок

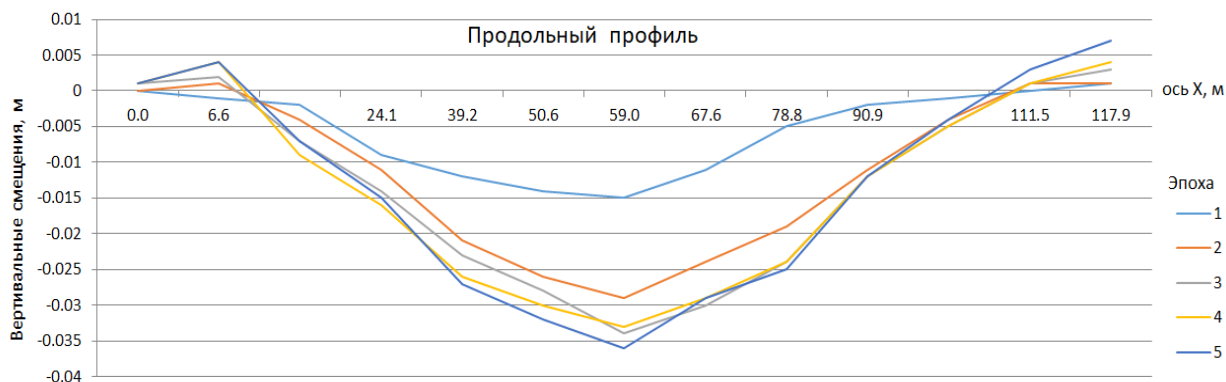


Рис. 6. Продольный профиль (29 – 1)

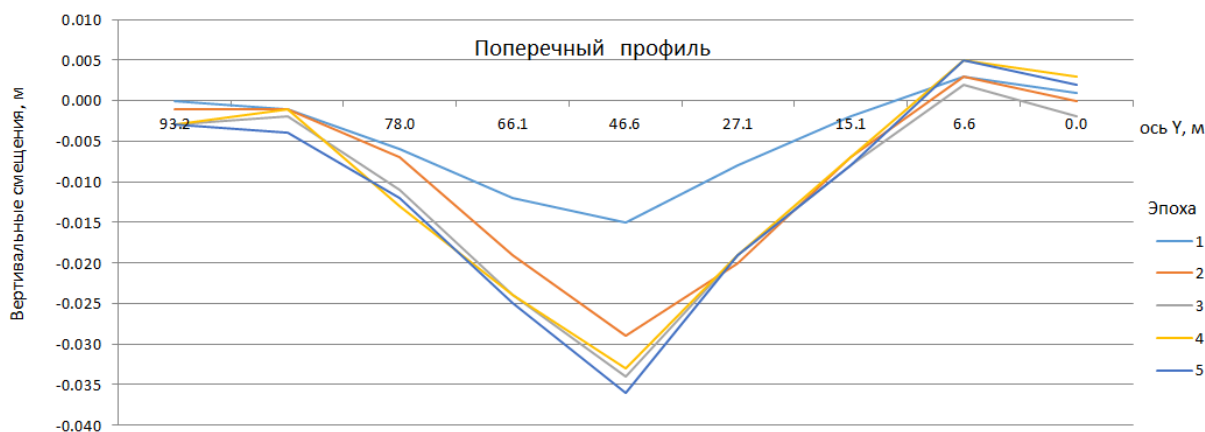


Рис. 7. Поперечный профиль (45 – 17)

На графиках рис. 6 и 7 цифрами подписаны эпохи измерений на разные даты, начальный цикл измерений был проведен 15.05.2018 г., 1 – 25.08.2018 г., 2 – 15.05.2019 г., 3 – 15.08.2019 г., 4 – 03.12.2019 г., 5 – 15.03.2020 г. Эти графики показывают, что по мере возрастания нагрузки, связанной с монтажом кровли и технологического оборудования на эпоху 1 и 2, вертикальные оседания возрастают, и в последующие эпохи – стабилизируются, и изменяются в незначительных пределах. Фактические максимальные деформации по высоте, для точки 46, были – 36 мм, что составляет 13,5 % от предельно допустимой, максимальное поднятие +7 мм на точке 19. В таблице приведены поверхности деформаций по соответствующим осям, относительно начального цикла измерений. Деформации в вертикальной плоскости (по оси Z) имеют вполне объяснимые причины и закономерности, увеличиваются от начального цикла в соответствии с возрастанием нагрузки и уменьшаются в последних циклах, после стабилизации нагрузки.

Деформации в горизонтальной плоскости тоже имеют некоторую закономерность, хотя и не такую выраженную, как по оси Z. Поверхности отклонений по осям X и Y показывают, что деформационные марки имеют смещения по оси X от –18 мм до +30 мм, и по оси Y от –15 мм до +16 мм, причем эти деформации имеют не равномерный, а со-

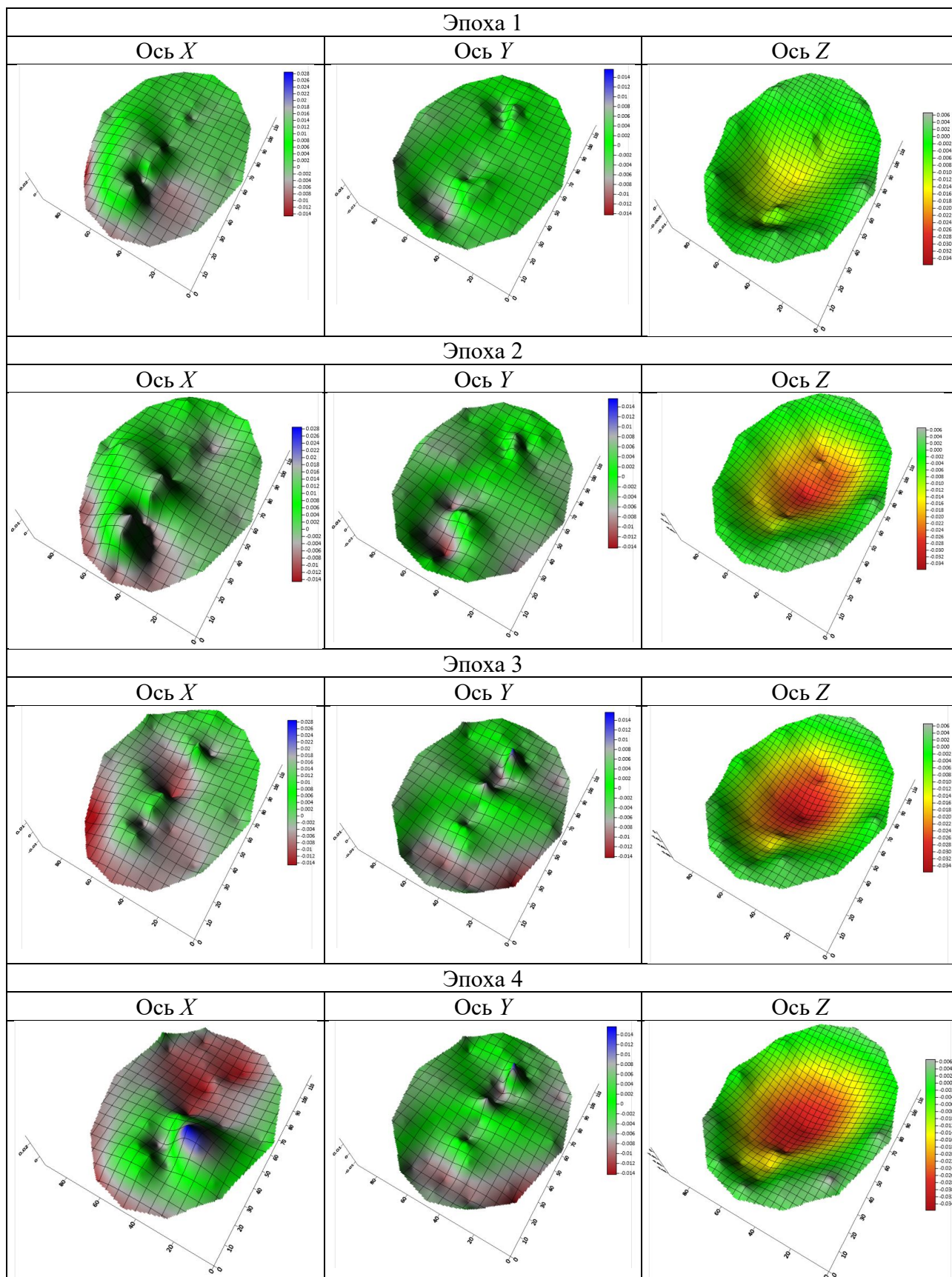
средоточенный характер.

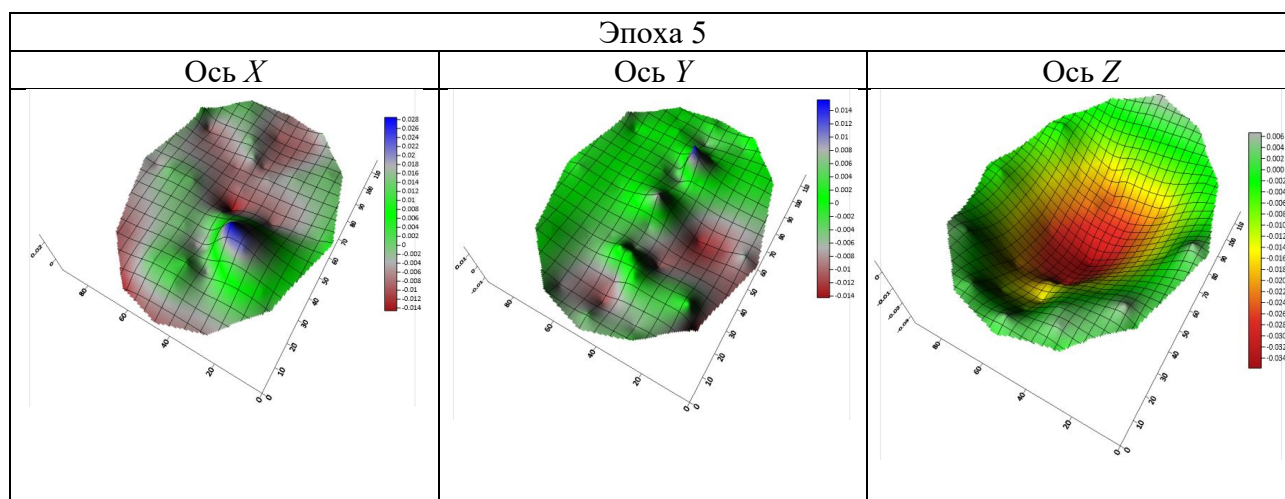
Значения деформации сильно зависят от воздействия температуры окружающей среды и динамических воздействий. В жаркий период присходят вертикальные движения средней части оболочки вниз – прогиб крыши, а боковые части по контуру имеют вертикальное смещение вверх. В частности, вертикальная деформация сильно зависит от температуры окружающей среды с сезонными изменениями до 20 мм.

Общий вес нагрузки от элементов кровли на конструкцию в эпоху 1 (см. рис. 6, 7) составлял 71 т. В промежуток наблюдения 1 – 2 были закончены работы по монтажу подвесных мостков в полном объеме. Общий вес подвесной нагрузки от веса мостков составлял 110 т. Также в этот период были закончены работы по монтажу витража со стеклами. Общий вес конструкции витража составляет 125 т. Вес стеклянной конструкции 156 т. Общий вес нагрузки на металлические конструкции на эпоху 2 составил 391 т.

Поверхности на эпохи 2 и 3 (рис. 6, 7) показывают, что после завершения основных монтажных работ процесс деформации замедлился, и поведение перекрытия стабилизировалось, хотя в этот период еще велись работы по монтажу инженерных коммуникации внутри помещения. После этого на структуру в основном влияет воздействие температуры окружающей среды.

Деформации по координатным осям на эпохи измерений





### Заключение

Оценка результатов геодезических измерений оболочки большепролетного сооружения с металлической пространственной конструкцией за более чем два года показала эффективность использования традиционных геодезических методов для мониторинга конструкций аналогичного типа. Результаты геодезических измерений свидетельствуют о том, что фактические значения деформаций являются невысокими и соответствуют теоретической модели деформации для объекта. Исходя из этой модели и геодезических измерений конструкций в процессе мониторинга в течение двухлетних измерений, для статического поведения конструкции можно считать допустимым значение вертикальной деформации до 40 мм. А для горизонтальных

перемещений по оси X и Y допустимыми можно считать  $\pm 30$  мм. Следует отметить, что до настоящего времени конструкция надежна и устойчива. На этапе строительства сооружение выдержало землетрясение в 6 баллов. Поэтому крайне важно оценить динамику изменений, чтобы определить потенциально слабые места в конструкции, где в будущем можно ожидать появления нестабильного поведения конструкции.

Следует продолжать мониторинг, чтобы получить дополнительную информацию о поведении конструкции во время ее эксплуатации. Данные, полученные по результатам геодезических измерений, можно использовать для уточнения модели статического поведения конструкции, ее мониторинга и проектирования новых несущих металлических конструкций большепролетных сооружений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Spampinato A. Stadio Olimpico di Roma [Electronic resource] // The world Stadiums. – Mode of access: <https://is.gd/48Hknu>.
2. Knowles E. Stansted Airport, Main Terminal [Electronic resource] // Engineering timelines. – Mode of access: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=235>.
3. Vinnitskaya I. MyZeil Shopping Mall / Studio Fuksas [Electronic resource] // ArchDaily. – Mode of access: <http://www.archdaily.com/243128/myzeil-shopping-mall-studio-fuksas>.
4. Jewel N. 2014 China Flower Expo Pavilions Resemble Giant Floating Flower Petals [Electronic resource] // Inhabitat. – Mode of access: <https://inhabitat.com/2014-china-flower-expo-pavilions-resemble-giant-floating-flower-petals/>.
5. Dale N. Waterloo International Terminal [Electronic resource] // Engineering timelines. – Mode of access: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=243>.
6. Popp P., Sans O. L. London 2012 – Velodrome [Electronic resource] // Detail-online. – Mode of access: <http://www.detail-online.com/article/london-2012-velodrome-16431>.
7. Daniel R., Alberto S. Response of large span steel frames subjected to horizontal and vertical seismic motions [Electronic resource] // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Paper number 1404. – Mode of access: [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_1404.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1404.pdf).
8. Research on Construction Monitoring of Large-Span Steel Pipe Truss Structure / K. L. Chen,



G. Q. Yuan, L. K. Wang, W. Z. Zhang, X. K. Wang [Electronic resource] // Open Journal of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 9. – P. 255–267. – Mode of access: <https://doi.org/10.4236/ojce.2019.94018> f.

9. Математические модели и техническая реализация GOCA – онлайн-системы геодезического мониторинга и оповещения о деформациях природных и техногенных объектов, основанная на точных спутниковых (GNSS) и наземных геодезических наблюдениях (LPS/LS) / Р. Ягер, П. Шпон, Т. Шайхутдинов, Т. И. Горохова, А. Ю. Янкуш // СИББЕЗОПАСНОСТЬ-СПАСИБ-2012. Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы жизнедеятельности населения: сб. материалов Междунар. науч. конгр., 25-27 сент. 2012 г., Новосибирск. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 194–217.

10. Главинский Д. В. Методика непрерывного автоматизированного мониторинга строительных конструкций покрытия в ледовом дворце «Уральская молния» // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2011. – № 3. – С. 64–68.

11. Автоматизированный контроль конструктивной безопасности уникальных объектов, включая высотные и широкопролетные / В. В. Гурьев, В. М. Дорофеев, Д. А. Лысов, Н. В. Назьмов // Строительная механика инжене-

рных конструкций и сооружений. – 2011. – № 2. – С. 55–61.

12. Практический опыт устройства стационарных автоматизированных систем мониторинга строительных конструкций на олимпийских объектах в городе Сочи / И. Е. Штунцайгер, Д. А. Лысов, А. С. Денисов, А. О. Слободенюк, А. И. Кугачев // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 4 (60). – С. 67–71.

13. 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.

14. Mogilny S., Sholomitskii A., Lagutina E. Bim and forecasting deformations in monitoring structures // GeoScience Engineering. – 2019. – Vol. LXV, No. 3. – P. 50–57. Doi: 10.35180/gse-2019-0018.

15. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Использование лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 43–57.

16. МДС 13-22.2009. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных зданий и уникальных зданий и сооружений. – М. : ОАО «ЦПП», ООО «Тектоплан», 2010. – 76 с.

Получено 13.05.2020

© А. А. Шоломицкий, Б. Н. Ахмедов, 2020

## GEODESIC MONITORING OF LARGE-SPAN CONSTRUCTIONS WITH SPATIAL METAL STRUCTURE

*Andrei A. Sholomitskii*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Dr. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: sholomitskij@mail.ru

*Bakhtiyor N. Akhmedov*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (953)873-09-06, e-mail: khudobakhsh@inbox.ru

The article draws the estimation of geodetic measurement results and conclusions, obtained at observation of deformations during the construction and exploitation of large span structure with bridging of space shell type, located on the territory with hazardous natural and seismic processes and hot climate. On the basis of measurement results of the vertical and horizontal deformation constituents the analysis of actual behavior of the constructions in these conditions was performed. Estimating the deformations on different stages and environmental parameters one can set critical parameters and tolerance for the behavior of a real spatial metal structure. The article draws the data of three observation cycles carried out during the construction process

and three ones performed after the start of operation. The observations allowed making a conclusion that the structure undergoes little appropriate deformations, which correspond to the designed ones.

**Key words:** spatial construction, monitoring, deformation, geodetic measurements, large span structure, calculated model, load, building load, environmental parameters.

## REFERENCES

1. Spampinato, A. (2019). Stadio Olimpico di Roma. *The World Stadiums*. Retrieved from <https://is.gd/48Hknu>.
2. Knowles, E. (2019). Stansted Airport, Main Terminal. *Engineering Timelines*. Retrieved from <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=235>.
3. Vinnitskaya, I. (2017). MyZeil Shopping Mall / StudioFuksas. *ArchDaily*. Retrieved from <http://www.archdaily.com/243128/myzeil-shopping-mall-studio-fuksas>.
4. Jewel, N. (2013). 2014 China Flower Expo Pavilions Resemble Giant Floating Flower Petals. *Inhabitat*. Retrieved from <https://inhabitat.com/2014-china-flower-expo-pavilions-resemble-giant-floating-flower-petals/>.
5. Dale, N. (2018). Waterloo International Terminal. *Engineering Timelines*. Retrieved from <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=243>.
6. Popp, P., & Sans, O. L. (2012). London 2012 – Velodrome. *Detail-online*. Retrieved from <http://www.detail-online.com/article/london-2012-velodrome-16431>.
7. Daniel, R., & Alberto, S. (2004). Response of large span steel frames subjected to horizontal and vertical seismic motions. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Paper number 1404. Retrieved from [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_1404.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1404.pdf).
8. Chen, K. L., Yuan, G. Q., Wang, L. K., Zhang, W. Z., & Wang, X. K. (2019). Research on Construction Monitoring of Large-Span Steel Pipe Truss Structure. *Open Journal of Civil Engineering*, 9, 255–267. Retrieved from <https://doi.org/10.4236/ojce.2019.94018>.
9. Jager, R., Shpon, P., Shajhutdinov, T., Gorohova, T., & Jankush, A. (2012). Mathematical models and technical realization of GOCA – on-line systems of geodetic monitoring and reporting about deformations of natural and technogenic objects, based on high-precision satellite and ground-based geodetic survey (LPS/LS). In *SIBBEZOPASNOST'-SPASSIB-2012. Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya, predo-tvrashcheniya i dempfirovaniya posledstviy chrezvychaynykh situatsiy regionov i problemy zhiznedeyatel'nosti naseleniya [Improvement of the Control System, Prevention and Damping of the Consequences of Emergency Situations of the Regions and the Problems of the Life of the Population]* (pp. 194–217). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
10. Glavinskij, D. V. (2011). The method of continuous automated monitoring of roof structures in ice arena "Ural'skaja molnija". *Monitoring. Nauka i bezopasnost' [Monitoring. Science and Security]*, 3, 64–68 [in Russian].
11. Gur'ev, V. V., Dorofeev, V. M., Lysov, D. A., & Naz'mov, N. V. (2011). Automated control of structural safety of unique objects including high-altitude and large span ones. *Stroitel'naja mehanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij [Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures]*, 2, 55–61 [in Russian].
12. Shtuncajger, I. E., Lysov, D. A., Denisov, A. S., Slobodenjuk, A. O., & Kugachev, A. I. (2015). Practical experience of construction of stationary automated monitoring systems for building structures of Olympic objects in the city of Sochi. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija [Construction and Reconstruction]*, 4(60), 67–71 [in Russian].
13. Sholomickii, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2017). High-precision geodetic measurements in deformation monitoring of Aquapark. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 45–59 [in Russian].
14. Mogilny, S., Sholomitskii, A., & Lagutina E. (2019). BIM and forecasting deformations in monitoring structures. *Geo Science Engineering, LXV(3)*, 50–57. doi: 10.35180/gse-2019-0018.
15. Sholomickii, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva E. L. (2018). The use of laser scanning for monitoring large span structures. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 43–57 [in Russian].
16. The method of geodetic monitoring of technical conditions of high-altitude buildings and unique buildings and structures. MDS 13-22.2009. (2010). Moscow: OAO "CPP", OOO "Tektoplan" Publ., 76 p. [in Russian].

Received 13.05.2020

© A. A. Sholomitskii, B. N. Akhmedov, 2020