

# ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

## BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 3. С. 183–195.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (3): 183–195.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.15

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-183-195

EDN: UULCUW

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОСНОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ ФУНДАМЕНТА

**Сергей Владимирович Никифоров**

*АО «Синергия», г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Стремительные темпы роста высоких и сверхвысоких зданий и сооружений в различных городах мира и в нашей стране вызывают изменение принципов их проектирования, строительства и мониторинга на этапах возведения и эксплуатации. Это связано с большими вертикальными и климатическими нагрузками на сооружения, необходимостью более эффективного использования материальных ресурсов и сокращения сроков ввода сооружений в эксплуатацию.

*Цель исследования* – оптимизация производственных процессов при строительстве фундаментных конструкций сверхвысотных зданий и сооружений.

*Научная новизна* – определение наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на выбор производственных процессов при возведении сверхвысотных зданий и сооружений.

*Выводы.* Приводятся результаты мониторинга коробчатого фундамента башни комплекса «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге высотой 462 м, являющейся самым высоким зданием в Европе. Дано описание структуры, принципов построения и функционирования автоматизированной системы мониторинга комплекса «Лахта Центр»; приведены и проанализированы результаты геотехнического мониторинга и мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций фундамента. Основные результаты данного исследования могут быть применены при эксплуатации и проектировании уникальных зданий и сооружений при их размещении на слабых структурно-неустойчивых грунтах.

**Ключевые слова:** высотные здания, коробчатый фундамент, свайное основание, слабые грунты, испытания свай, геотехнический мониторинг, мониторинг напряженно-деформированного состояния

*Для цитирования:* Никифоров С.В. Автоматизированная система мониторинга основания и конструкций фундамента // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-183-195. EDN: UULCUW

## ORIGINAL ARTICLE

**AUTOMATED MONITORING SYSTEM  
FOR BUILDING FOUNDATION STRUCTURES****Sergey V. Nikiforov**

АО “Synergy”, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** The number of tall and supertall buildings dramatically grows in Russian and abroad, that drives transformation of design, construction and monitoring principles. Such changes are necessitated by higher vertical and climatic loads on structures, need for a more efficient use of materials and early commissioning.

*Purpose:* Optimization of production processes in foundation structures of super tall buildings.

*Methodology:* The analysis of results of geotechnical monitoring and stress-strain state of foundation structures.

*Research findings:* The applicability of foundations in operation and design of unique buildings designed for structurally unstable soils. Results of monitoring are presented for a 462 m high box-shaped foundation of a tower, a central building of the “Lakhta Center” in Saint-Petersburg, and the tallest building in Europe. The automated monitoring system is used to study the structure, design and operation principles of the “Lakhta Center”.

*Value:* Determination of the most significant factors influencing the choice of production processes during the construction of super-tall buildings.

**Keywords:** high-rise buildings, box-shaped foundation, pile foundation, soft soil, pile testing, geotechnical monitoring, stress-strain state

**For citation:** Nikiforov S.V. Automated monitoring system for building foundation structures. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-183-195. EDN: UULCUW

**Введение**

Мониторинг высотного здания является важным инструментом контроля безопасности строительства уникального сооружения и осуществляется на всех стадиях возведения небоскреба.

Мониторинг механической безопасности заключается в одновременном проведении мониторинга параметров и мониторинга технического состояния. Измеренные значения параметров состояния объекта (осадок, кренов, напряжений в конструкциях, ширины раскрытия трещин, уровня грунтовых вод, горизонтальных смещений и т. п.) необходимо сравнивать с прогнозируемыми значениями, рассчитанными по математической компьютерной модели объекта для текущего этапа строительства с учетом фактора времени.

**Описание системы мониторинга**

Мониторинг высотного здания является важным инструментом контроля безопасности строительства уникального сооружения и осуществляется на всех стадиях строительства небоскреба.

Мониторинг высотного здания (рис. 1) можно подразделить на несколько измерительных комплексов:

- 1) геотехнический мониторинг за горизонтальными смещениями ограждения котлована производится на стадии выемки котлована и устройства конструкций подземного объема здания;
- 2) геотехнический мониторинг за напряженно-деформированным состоянием основания производится на стадии выемки котлована, устройства подземного сооружения и возведения наземной части здания;
- 3) геотехнический мониторинг напряженно-деформированного состояния фундаментов;
- 4) мониторинг конструкций подземной и наземной частей по мере возведения здания.



Рис. 1. Система автоматизированного мониторинга комплекса «Лакhta Центр»  
 Fig. 1. Automated monitoring system for the “Lakhta Center”

По окончании строительства четвертый измерительный комплекс был дополнен системой автоматизированной обработки информации и системой контроля механической безопасности, что в совокупности составило пятый измерительный комплекс, позволяющий осуществлять интерактивный мониторинг состояния конструкций на стадии эксплуатации [1].

Принципы интерактивного мониторинга включают в себя возможность сравнения данных мониторинга с прогнозом, обратного анализа результатов мониторинга с использованием компьютерных моделей объекта, возможность корректировки прогноза или принятия на основе проведенного анализа необходимых управленческих решений [2].

Признаками работоспособной системы мониторинга являются: наличие реакции на опасные процессы, адекватная оценка степени опасности, своевременное выявление опасных процессов для обеспечения возможности анализа ситуации специалистами и принятия необходимых мер, наличие формализованной подсистемы принятия управленческих решений. Построение работоспособной системы мониторинга невозможно без введения в систему прогнозируемых величин наблюдаемых параметров; критерием состояния «тревоги» должно являться существенное отклонение показаний от прогнозируемых значений.

Расчеты конструкций и компьютерные модели для определения прогнозируемых значений параметров должны отличаться от расчетов и моделей при проектировании данных конструкций. В отличие от расчетов при проектировании, всегда выполняемых «в запас прочности», расчеты для определения прогнозируемых параметров должны отражать наиболее вероятное состояние рассчитываемой конструкции, компьютерные модели по возможности должны наиболее полно отражать действительную работу конструкций.

Проект геотехнического мониторинга был выполнен в НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»» под руководством О.А. Шулятьева. Институтом ООО «ПИ Геореконструкция» была выполнена работа по геотехническому мониторингу (по первому, второму и третьему измерительным комплексам), а также совместно с компанией «Телрос» организована система интерактивного мониторинга состояния конструкций при эксплуатации (пятый измерительный комплекс).

В рамках первого измерительного комплекса до выемки котлована вокруг ограждения подземной части здания была размещена система инклинометров. Одновременно было установлено геотехническое оборудование второго комплекса, включающее датчики порового давления, марки для измерения послойных осадок основания (экстензометры).

По мере устройства конструкций подземной части здания осуществлялась установка оборудования третьего измерительного комплекса: тензодатчики в сваях, датчики для определения давления под подошвой ростверка, в нижней плите коробчатого фундамента, а далее – четвертого комплекса – в стенах подземных этажей и в верхней плите коробчатого фундамента. При возведении наземных конструкций в ядре жесткости и колоннах устанавливались датчики напряжений.

На этапе эксплуатации была организована система интерактивного мониторинга, интегрированная с системой управления зданиями Лахта Центра.

#### **Контроль горизонтальных смещений «стены в грунте» с помощью инклинометров**

Подземная часть башни Лахта-Центра была спроектирована пентагональной в плане. По контуру сооружения устраивалась монолитная «стена в грунте». Для восприятия горизонтальных усилий устраивались «распорные кольца» в виде временных межэтажных перекрытий. Для контроля за горизонтальными смещениями по контуру подземной части была предусмотрена система инклинометров (рис. 2).

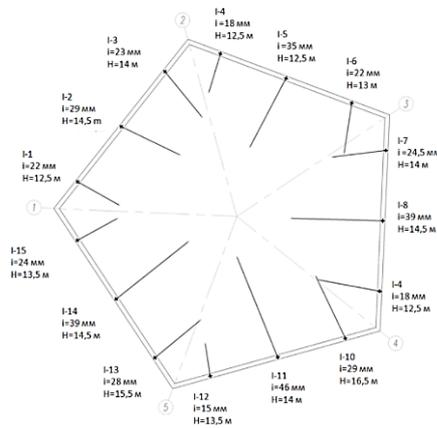


Рис. 2. Схема расположения инклинометров и векторы их максимальных суммарных смещений  
 Fig. 2. Inclinometer arrangement and vectors of their maximum total displacement

На основе полученных данных были построены векторы максимальных суммарных смещений инклинометров (рис. 2), начиная с момента выемки котлована в августе 2013 г. до апреля 2015 г., когда было завершено устройство железобетонной плиты днища и перекрытия над нижним подземным этажом. Максимальное суммарное смещение наблюдалось по инклинометру I-11 на глубине 14 м, оно составляло 46,4 мм (рис. 3). Измеренные горизонтальные перемещения не превышали максимальных расчетных значений (76 мм).

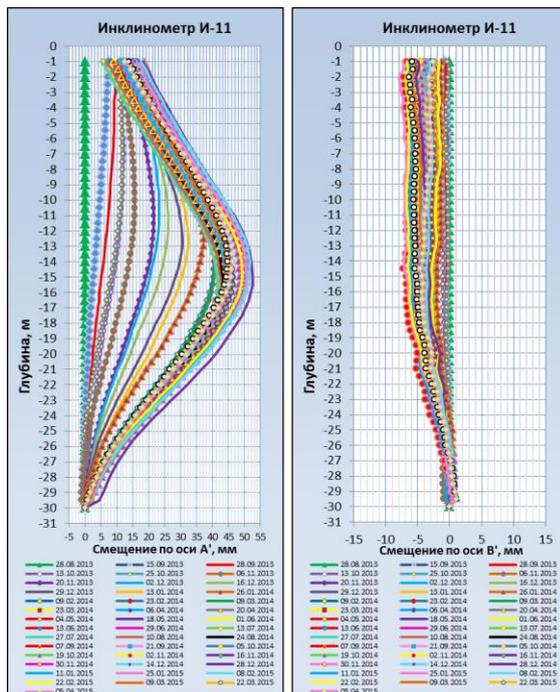


Рис. 3. Горизонтальные смещения «стены в грунте» внутрь котлована по инклинометрам  
 Fig. 3. Horizontal displacement of wall in soil inside excavation according to inclinometers

Результаты измерений демонстрируют, что, в отличие от цилиндрической формы подземной части, пентагональное в плане подземное сооружение, безусловно, не позволяет достичь минимальных и при этом одинаковых горизонтальных смещений ограждения котлована. Смещения в более жестких угловых зонах, как и ожидалось, оказались почти вдвое меньше, чем в середине каждой стороны пятиугольника. Однако правильная форма подземного сооружения в плане позволяет все же использовать эффект «бочки с обручами внутри», работающей на наружное давление, и тем самым проводить работы в почти полностью открытом котловане с минимальной зоной работ под перекрытиями контурных распорных «обручей».

### Контроль порового давления

Для контроля порового давления в основании сооружения был использован многоуровневый скважинный пьезометр, представляющий собой цепочку преобразователей давления струнного типа, подсоединенных к общему многожильному кабелю. Многожильный кабель обеспечивает возможность независимых измерений порового давления воды на восьми уровнях в скважине. Датчики порового давления снабжены фильтровыми наконечниками с размерами пор 40–50 мкм.

Для наблюдений за изменением порового давления в грунте межсвайного пространства в июне – июле 2013 г. было выполнено бурение и обустройство пяти наблюдательных скважин глубиной 97 м с восемью датчиками в каждой (рис. 4).

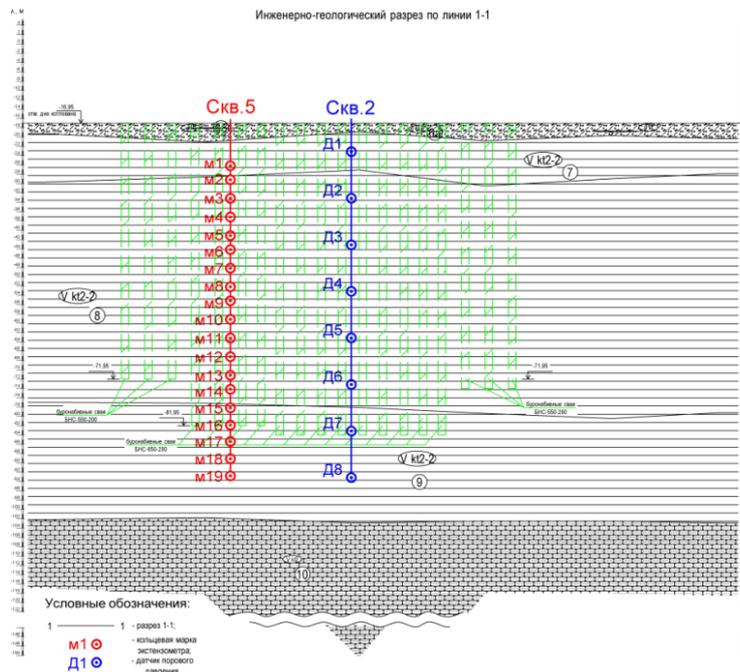


Рис. 4. Расположение экстензометров и вертикалей с датчиками порового давления  
Fig. 4. Location of extensometers and verticals with pore pressure sensors

Во всех скважинных пьезометрах были зарегистрированы практически идентичные показания. Для примера на рис. 5 представлены графики показаний датчиков порового давления скважины 2.

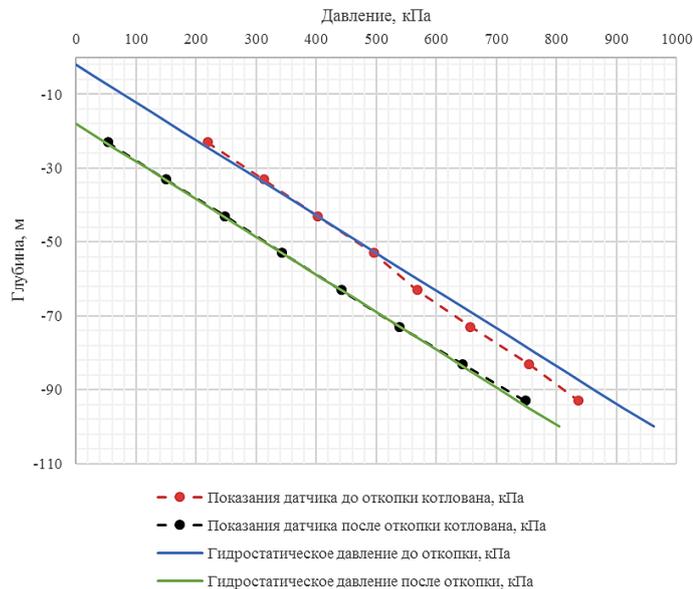


Рис. 5. Показания датчиков порового давления, установленных в скважине № 2  
 Fig. 5. Readings of pore pressure sensors installed in well 2

Анализ результатов измерения порового давления показывает, что в начале наблюдений показания датчиков на всех глубинах примерно соответствуют гидростатическому давлению (давлению столба воды) с нулем ориентировочно на уровне Кронштадтского футштока (0 м БСВ), т. е. уровня Финского залива в состоянии покоя. В период устройства подземной части здания показания датчиков в верхней части разреза на глубине 23–35 м падают (с 07.08.2013 по 07.04.2014) в точности на величину снятого при откопке котлована столба воды (15–16 м). По мере возрастания глубины установки датчика это падение снижается (на глубине 83–95 м вдвое). Впоследствии, по мере возведения здания, наблюдается медленный рост показаний датчиков: на 07.12.2015, когда ядро возведено уже на высоту 50 м над землей, прирост показаний еще не достигает исходного гидростатического уровня, что может быть связано с колебаниями уровня воды в Финском заливе.

Показания датчиков порового давления демонстрируют исключительно гидростатическое давление воды, действующее на всей глубине, включая слои отложений венда. Никаких признаков возникновения избыточных поровых давлений не наблюдается.

### Измерение послойных деформаций основания

Для наблюдений за послойными осадками основания в июне – июле 2013 г. было выполнено бурение и обустройство пяти наблюдательных скважин глубиной 97 м (см. рис. 4). В каждой скважине было размещено 19 дат-

чиков вертикальных перемещений грунтового массива (кольцевые марки) магнитного многоуровневого скважинного экстензометра. Результаты измерений послойных осадок свайного основания представлены на рис. 6.

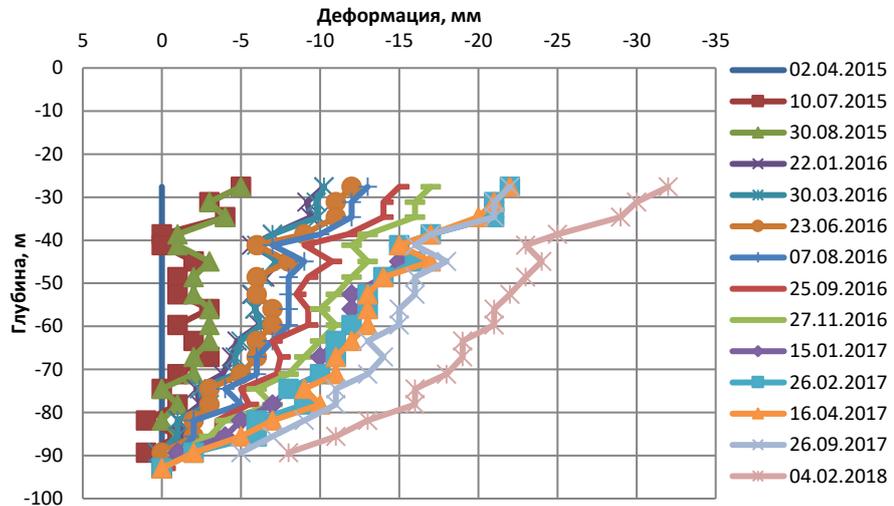


Рис. 6. Эпюры деформаций по экстензометрам  
Fig. 6. Strain diagrams from extensometers

Согласно результатам измерений по экстензометрам, осадки высотного здания развивались по возрастающей кривой и достигли к моменту окончания строительства в 2018 г. 32 мм в зоне под ядром. В краевых зонах осадки оказались вдвое меньше. При этом примерно такие же осадки были зафиксированы геодезическими способами, привязанными к фундаментным реперам. Следовательно, можно утверждать, что весьма ограниченный слой грунта претерпевает осадки под пятой сваи.

В развитие осадок внес вклад и эффект сжатия «условного фундамента», состоящего из свай и грунта в межсвайном пространстве. К моменту завершения строительства на сжатие «условного фундамента» приходилось почти 2/3 накопленных осадок. Измеренные величины осадок коррелируют с выполненными авторами монографии [3] результатами расчета длительных осадок здания на нелинейном вязкопластическом основании (с учетом возможного развития длительной ползучести). По результатам расчетов максимальная длительная осадка здания достигнет 8 см при сравнительно небольшой неравномерности осадок. При этом доля ползучести составляет порядка 30 %. Согласно расчетам, в процессе строительства здания должно быть реализовано примерно 3 см осадки, что хорошо согласуется с результатами наблюдений.

#### Измерение давления под подошвой ростверка

Для наблюдений за давлением под подошвой ростверка была произведена установка 10 датчиков давления (рис. 7). Измерение давления было начато после устройства плиты днища в апреле 2015 г. Результаты измерений представлены на рис. 8.

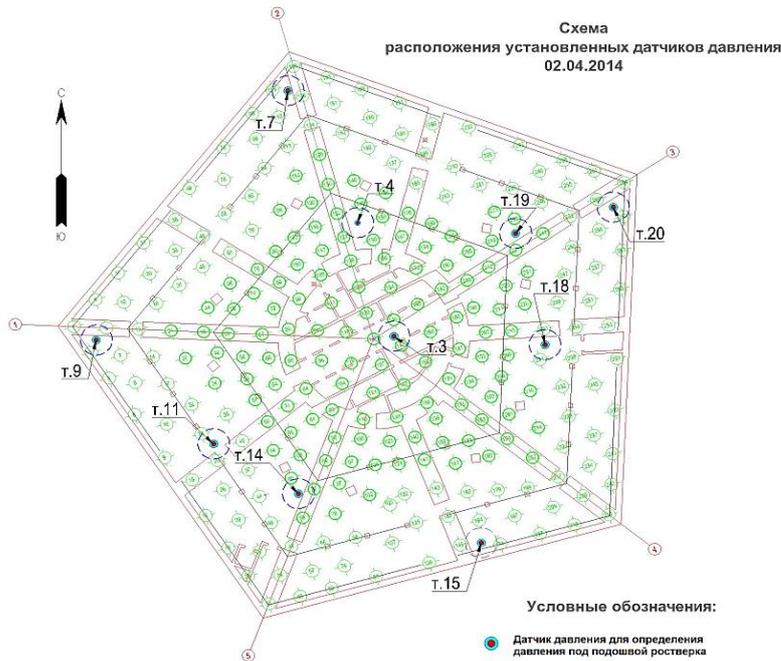


Рис. 7. Схема расположения датчиков для определения давления под подошвой ростверка  
 Fig. 7. Schematic diagram of sensors for pressure detection under the foundation footing

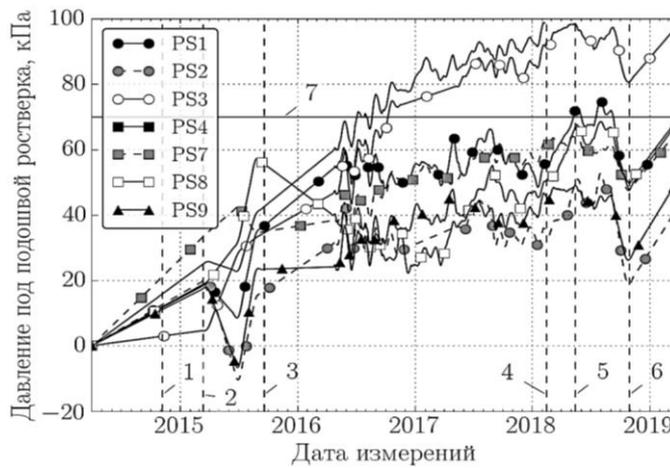


Рис. 8. Графики изменения давления под подошвой ростверка:  
 PS1–PS9 – датчики контактного давления под подошвой фундамента (схему расположения см. на рис. 7); 1 – устройство силовой железобетонной подготовки; 2 – начало демонтажа распорной системы; 3 – завершение строительства подземной части; 4 – завершение устройства железобетонных конструкций; 5 – окончание монтажа шпиля; 6 – отделочные работы; 7 – проектная величина контактного давления под подошвой ростверка

Fig. 8. Pressure changes under foundation bottom:  
 1 – construction of reinforced concrete bedding; 2 – anchor system dismantling; 3 – underground part; 4 – reinforced concrete structures; 5 – fleche installation; 6 – finishing; 7 – design value of contact pressure. PS1–PS9 are contact pressure sensors

Результаты измерений давления под подошвой ростверка демонстрируют, что контактные давления грунта по подошве ростверка составляют 72,4 кПа, т. е. 16 % от суммарного веса возведенного сооружения. Полученная величина хорошо согласуется с результатами расчетов и общими представлениями о работе свайного фундамента. Таким образом, плита ростверка слабо участвует в работе свайного фундамента. Следовательно, такой фундамент нельзя рассматривать как плитно-свайный, он должен считаться свайным (что совершенно справедливо и было заложено в проектном решении). В данном случае под плитой ростверка залегают моренные отложения, сжимаемость которых существенно выше, чем отложений венда, на которые опираются сваи. Данные результаты подтверждают, что в случае залегания под подошвой плиты существенно более податливого основания, по сравнению с основным несущим слоем свайного основания, предпочтение следует отдавать свайным типам фундаментов.

### Мониторинг конструкций фундамента

Для проведения мониторинга зданий Лахта Центра была спроектирована автоматизированная система мониторинга деформационного состояния (СМДС), объединившая системы геотехнического мониторинга, деформаций коробчатого фундамента (КФ), мониторинга высотной части башни, мониторинга конструкций многофункционального здания (МФЗ) и входной Арки [4].

После завершения строительства система мониторинга была интегрирована с системой управления зданием (BMS) с включением ряда измерительных систем (рис. 9), которые будут способствовать безопасной эксплуатации уникальных зданий.

Система мониторинга деформации КФ (рис. 10) – наиболее масштабная и сложная подсистема в составе СМДС – была спроектирована для анализа изменений НДС фундамента. Для комплексного анализа напряженно-деформированного состояния на стержни рабочей арматуры нижней плиты, стен-диафрагм и верхней плиты было установлено в общей сложности 1210 струнных тензометров, объединенных в 196 створов. Каждый створ, в зависимости от типа конструкции и характера её деформирования, включает в себя 2 или 3 измерительных пункта. Измерительные пункты оборудованы парой датчиков, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль рабочих арматурных стержней. Такая конфигурация системы для сравнения с результатами расчета позволила с достаточной точностью определить распределение напряжений по толщине плит и стен КФ.

Проектные решения по размещению датчиков деформации в плитах коробчатого фундамента позволили в процессе возведения детально контролировать и очень подробно изучать напряженно-деформированное состояние этих крайне ответственных элементов конструкций башни (рис. 11).

По результатам измерения деформации были определены напряжения и усилия в трех наиболее нагруженных арматурных сетках нижней плиты и двух сетках верхней плиты, а также напряжения в теле бетона. Путем интегрирования по высоте сечения эпюры нормальных напряжений были вычислены действующие в плитах изгибающие и мембранные усилия, которые сравнили с результатами конечно-элементного моделирования.

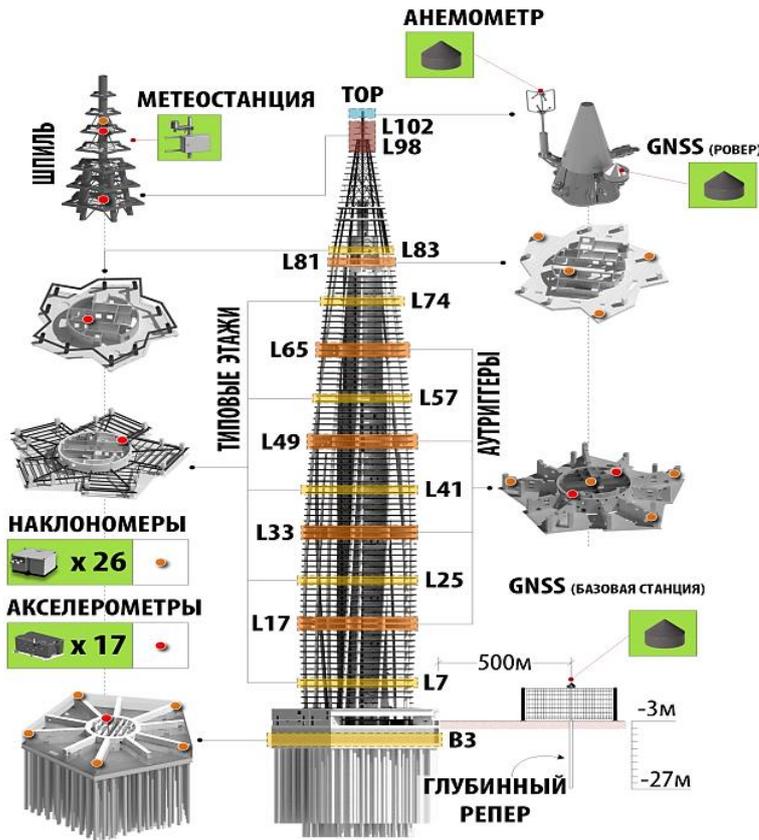


Рис. 9. Состав системы мониторинга  
Fig. 9. Monitoring system composition

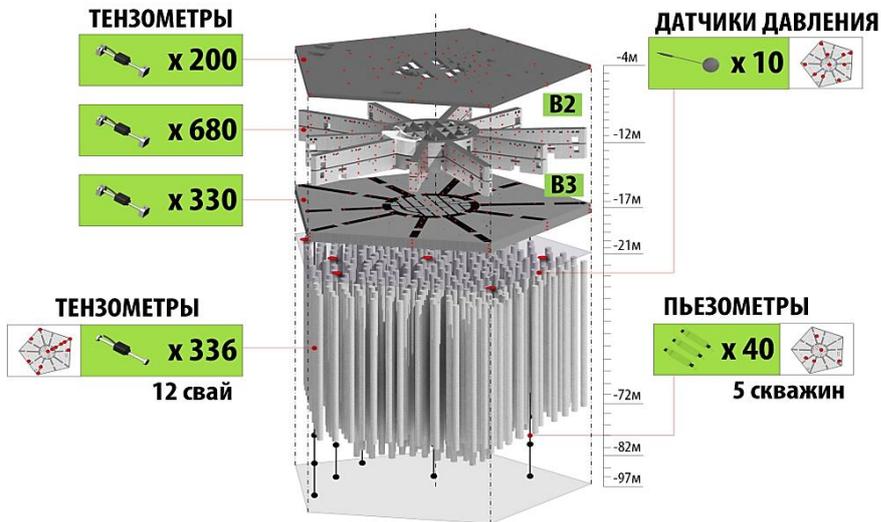


Рис. 10. Система мониторинга деформаций коробчатого фундамента  
Fig. 10. Monitoring system of box foundation deformation

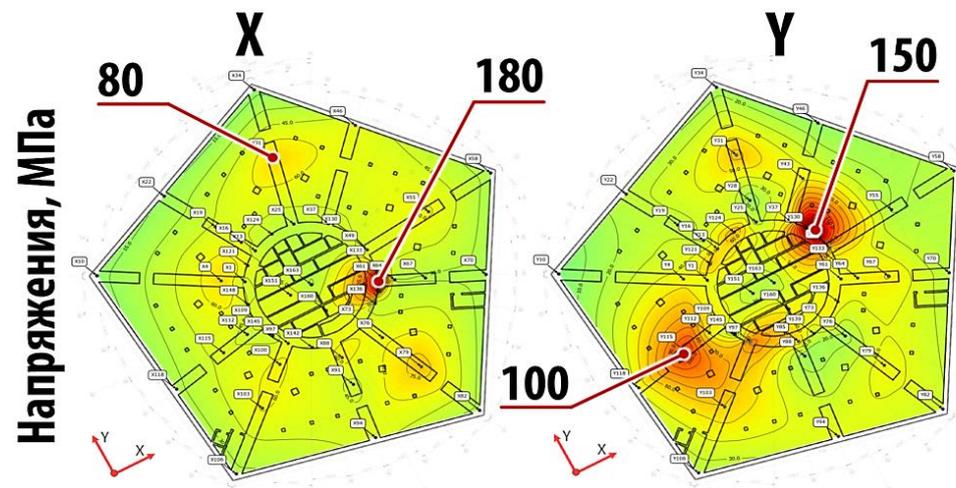


Рис. 11. Изополя напряжений в нижней арматурной сетке нижней плиты  
 Fig. 11. Stress isofields in bottom slab reinforcement mesh

Результаты мониторинга нижней плиты КФ показали, что расчетная жесткость основания отличается от реальной, что приводит к различиям в характере распределения усилий по площади плиты. В то же время амплитудные значения усилий отличаются от расчетных незначительно.

Проектные решения по мониторингу деформации нижней плиты КФ позволили определить реальные напряжения в рабочей арматуре. В частности, в наиболее нагруженной нижней арматурной сетке растягивающие напряжения не превышают 80 МПа (см. рис. 11), за исключением небольшого числа локальных концентраций.

### Выводы

Дано описание структуры, принципов построения и функционирования автоматизированной системы мониторинга комплекса «Лахта Центр». Приведены и проанализированы результаты геотехнического мониторинга «условного» фундамента, включающего в себя сваи и грунт межсвайного пространства. Представлены данные о напряженно-деформированном состоянии конструкций коробчатого фундамента.

Практический опыт по реализации строительства уникального высотного здания в сложных грунтовых условиях позволил усовершенствовать методики геотехнических расчётов, расчётов конструкций из высокоармированного и высокопрочного железобетона; внедрить современные технологии строительного производства; реализовать на практике идеи и принципы интерактивного мониторинга в периоды строительства и эксплуатации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Богов С.Г., Лукин В.М. Результаты геотехнического мониторинга при строительстве высотного здания в г. Санкт-Петербурге // Геотехника. 2020. Т. XII. № 3. С. 36–52.

2. *Шашкин К.Г.* Теоретические основы интерактивного мониторинга сложных зданий и подземных сооружений // *Геотехника*. 2018. Т. X. № 3. С. 26–35.
3. *Шашкин А.Г.* Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Москва : Академическая наука. Геомаркетинг, 2014. 352 с.
4. *Травуш В.И., Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А., Шахворостов А.И., Десяткин М.А., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О.* Лахта Центр: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. 2018. № 4. С. 94–108.

#### REFERENCES

1. *Shashkin A.G., Shashkin K.G., Bogov S.G., Lukin V.M.* Results of geotechnical monitoring during construction of a high-rise building in St.-Petersburg. *Geotechnika*. 2020; 12 (3): 36–52. (In Russian)
2. *Shashkin K.G.* Theoretical foundations of interactive monitoring of complex buildings and underground structures. *Geotechnika*. 2018; 10 (3): 26–35. (In Russian)
3. *Shashkin A.G.* Design of buildings and underground structures in challenging engineering geology conditions in St.-Petersburg. Moscow: Akademicheskaya nauka. Geomarketing, 2014. 352 p. (In Russian)
4. *Travush V.I., Shakhramanyan A.M., Kolotovich Yu.A., Shakhvorostov A.I., Desyatkin M.A., Shulyaev O.A., Shulyaev S.O.* Lakhta Center: Automated monitoring of deformations of load-bearing structures and foundations. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2018; (4): 94–108. (In Russian)

#### Сведения об авторе

*Никифоров Сергей Владимирович*, директор по проектированию, АО «Синергия», 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая морская, 24, sergeivnikiforov@gmail.com

#### Authors Details

*Sergey V. Nikiforov*, Director for Engineering, AO “Synergy”, 24, Bolshaya Morskaya Str., 190000, Saint-Petersburg, Russia, sergeivnikiforov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13.05.2024  
Одобрена после рецензирования 30.05.2024  
Принята к публикации 31.05.2024

Submitted for publication 13.05.2024  
Approved after review 30.05.2024  
Accepted for publication 31.05.2024