

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЕНСАЦИОННОГО НАГНЕТЕНИЯ КАК МЕРЫ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

*Е.М. Волохов, В.К. Кожухарова,
Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;
А.Э. Волкотруб,
ООО «ГК Уровень», г. Санкт-Петербург, Россия;
Л.М. Назмутдинов,
СПб ГКУ «Дирекция транспортного строительства», г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация: В статье анализируется опыт применения компенсационного нагнетания с целью защиты зданий от вредного влияния горных работ при строительстве подземных сооружений на примере станции метро «Театральная», г. Санкт-Петербург. Проведен совместный анализ вертикальных сдвижений стенных и грунтовых профильных реперов по данным маркшейдерско-геодезических наблюдений и скважинных экстензометрических измерений. В ходе исследований определено, что помимо влияния горных работ и компенсационного нагнетания, на сдвижения земной поверхности влияют климатические условия, а также жесткость близлежащих зданий и сооружений. В работе показано, что способ компенсационного нагнетания, направленный на предотвращение реализации сверхнормативных деформаций зданий способен обеспечивать компенсацию развивающихся деформаций, однако, при определенных условиях, в том числе несоблюдении проектных решений может нанести вред охраняемому от подрботки зданию. По результатам исследования приведены рекомендации по выполнению компенсационного нагнетания в современных условиях и его маркшейдерскому контролю при освоении подземного пространства городов.

Ключевые слова: охрана зданий и сооружений, подземное строительство, мульда сдвижения, оседания зданий, сдвижение земной поверхности, повреждение зданий и сооружений, компенсационное нагнетание.

ANALYSIS OF DEFORMATIONS OF THE EARTH'S SURFACE DURING THE CONSTRUCTION OF METRO STATIONS USING COMPENSATION GROUTING TECHNOLOGY AS A PROTECTION MEASURE FOR BUILDINGS

*E.M. Volokhov, V.K. Kozhukharova,
St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia;
A.E. Volkotrub,
GK Uroven LLC, St. Petersburg, Russia;
L.M. Nazmutdinov,
SPb GКУ «Directorate of transport construction», St. Petersburg, Russia*

Abstract: The article analyzes the experience of using compensation grouting to protect buildings during the construction of underground structures on the example of the Teatralnaya metro station, St. Petersburg.

To assess the effectiveness of measures by the method of compensation grouting, data from surveying, geodetic and geotechnical measurements were analyzed. Extensometric wells located along the perimeter of buildings above the Teatralnaya station complex were used as a method of monitoring deformations of the rock mass.

The available results of field data show that the technical implementation of the compensation grouting system does not yet allow for stable and satisfactory compensation of deformations, and may even increase the risks of additional deformations and damage to buildings. In the context of the development of a new technology to ensure the protection of undermined buildings using compensation grouting, it is necessary to consider the use of enhanced supervision by the designer, the use of modern automated surveying and geodetic control and geotechnical monitoring (in "real time" mode).

In addition to the impact on the displacement of the Earth's surface of mining and compensation grouting, other external factors have been identified that require further research using automated means of deformation monitoring.

The results of the research can be useful in the design of building protection measures in the conditions of undermining, as well as in the organization of a monitoring system for deformations of the Earth's surface, buildings and structures.

Keywords: protection of buildings and structures, underground construction, displacement trough, settlements of buildings, displacement of the earth's surface, damage to buildings and structures, compensation grouting.

Строительство метрополитена в крупных городах непременно приводит к сдвиганию земной поверхности, что сопровождается негативным влиянием на подрабатываемые здания и сооружения. Современные условия подземного строительства пока не позволяют обеспечить полное отсутствие деформаций на земной поверхности [1]. В результате над станционными и другими комплексами выработок образуются обширные зоны техногенных оседаний (мульды сдвижения). Зоны оседаний над станциями глубокого заложения по площади могут превышать 2-3 гектара. Оседания в мульде неравномерны и обычно достигают существенных величин в 80-120 мм [2]. При плотной застройке поверхности в зону оседаний попадают десятки сооружений. Неравномерные оседания инициируют развитие деформации и нарушений в зданиях и их конструктивных элементах.

Большая часть зданий в центре Санкт-Петербурга относится к застройке XVIII-XIX века с бутовыми фундаментами на деревянных лежнях с деревянными перекрытиями [3], большинство из них отнесены к третьей категории технического состояния. Любая дополнительная деформация потенциально может привести к их аварийному состоянию. Для предотвращения возникновения сверхнормативных деформаций и обеспечения защиты зданий при строительстве выработок станции метро «Театральная» были реализованы мероприятия по компенсационному нагнетанию. Впервые, в городе Санкт-Петербург, эта технология применялась при строительстве эскалаторного тоннеля станции метро «Адмиралтейская» [4]. Метод компенсационного нагнетания предусматривает инъекцию медленно твердеющего раствора заданной вязкости в грунты основания сооружения, осадки которого следует компенсировать [5-7]. При применении подобных мер необходимо организовывать комплексный маркшейдерско-геодезический и геотехнический мониторинг, который бы соответствовал современным условиям строительства подземных сооружений и обеспечивал учёт и анализ текущего развития деформаций, а также геомеханическое прогнозирование. Однако, часто на производстве результаты измерений не подвергаются глубокому изучению, даже при нестандартных показателях деформаций. Анализ закономерностей развития деформаций остается уделом научных исследований, и обычно осуществляется только после реализации защитных мероприятий. Среди таких исследований можно упомянуть в области Московского метрополитана работы Никифоровой И.Л. [8-10] и Гришина А.В. [11], в области Санкт-Петербургского метрополитана работы Волохова Е.М. [12], Хуцкого В.П. [13], Наумова А.С. [14, 15], Костенко Б.В. [16, 17]. Однако исследований, посвященных оценке защитных мероприятий, практически нет. Поэтому вопрос текущей оценки влияния горных работ, с учетом принятых мер по защите зданий и их анализа, требует отдельного рассмотрения, особенно для сложных случаев станционных комплексов.

В настоящей работе анализ сдвижений с учетом влияния компенсационного нагнетания рассматривается на примере проходки среднего станционного тоннеля (ССТ) — самой крупной выработки станционного комплекса «Театральная».

Цель исследований: определение особенностей геомеханических процессов и эффективности применения мероприятий по защите зданий и сооружений способом компенсационного нагнетания на примере строительства станции «Театральная».

Объект исследований

Комплекс подземных выработок станции «Театральная», здания и сооружения, попавшие в зону подработки.

Методы и материалы исследования

Для оценки эффективности проведения мероприятий методом компенсационного нагнетания анализировались данные маркшейдерско-геодезических и геотехнических измерений. Так как в исследовании объем технологических данных и данных мониторинга был ограничен, результаты исследования носят первичный постановочный характер. Наблюдение за деформациями земной поверхности и наземных сооружений выполнялось повторными измерениями текущего пространственного положения грунтовых (профильных) и ственных деформационных реперов (рис. 1а). В качестве метода наблюдения за деформациями породного массива использовались экстензометрические скважины, расположенные по периметру зданий, находящихся над станционным комплексом «Театральная» (рис. 1б). Скважины здесь были оснащены пятью экстензометрами для измерения сдвижений реперов, расположенных на глубинах 5 м, 9 м, 12 м, 19 м и 31 м от поверхности земли. Экстензометр — датчик для измерения удлинения и, соответственно, контроля деформаций. В данном случае — контроля смещения глубинного репера во время проведения горных работ [18, 19]. На рис. 1 отображены те репера и экстензометрические скважины, которые были использованы для деформационного мониторинга за домом № 29 по улице «Д».

Результаты исследования. Наблюдения за оседаниями земной поверхности над средним станционным тоннелем (ССТ) было решено провести по профильным реперам Rp3 - Rp13, расположенных вдоль домов №31 и №29 по улице «Д» (рис. 2). По динамике оседаний реперов можно потенциально оценить влияние проходки ССТ. Первичный анализ смещений реперов показал дискретный характер их развития. В выявленной дискретности наблюдалась определенная цикличность, первоначально связанная с дискретностью проходки из-за использования опережающего анкерного крепления, применение которого должно было способствовать уменьшению деформаций в призабойной зоне и снижению деформаций земной поверхности [20,21].

Для анализа влияния цикличности проходки был построен график развития сдвижений по профильным реперам, совмещенный с графиком установки колец ССТ (рис. 3). Каждое кольцо обозначено черной линией, остановки — белые промежутки, остановки под опережающее крепление отмечены серым цветом. Сопоставление циклов оседаний и циклов проходки не позволило выявить закономерной связи. Поэтому, с целью определения влияния компенсационного нагнетания на сдвижение земной поверхности, было решено рассмотреть тенденции изменения оседаний некоторых групп реперов по линии вдоль движения забоя.

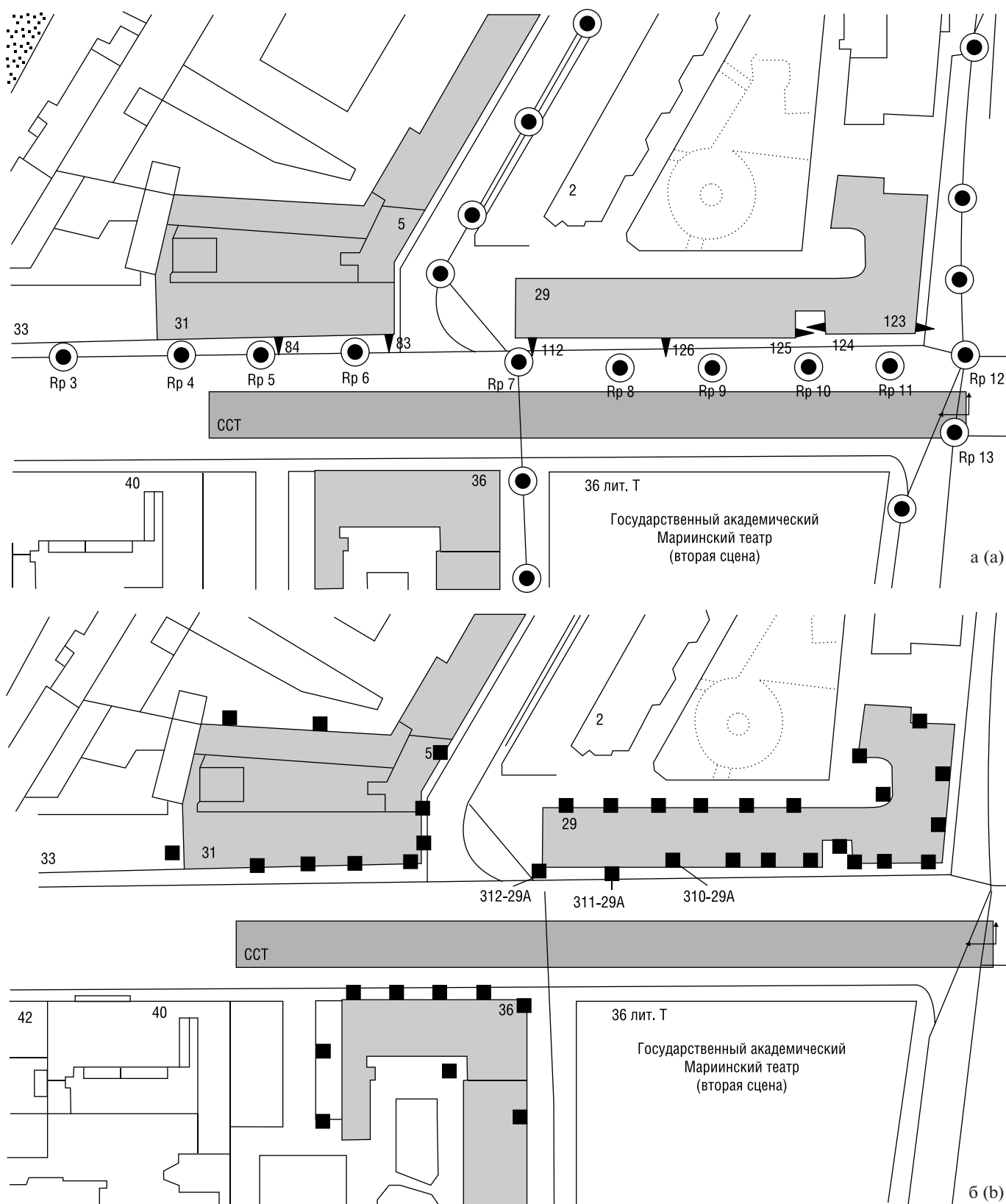


Рис. 1. Расположение наблюдательных станций: а) грунтовые и стенные репера; б) экстензометрические скважины /
Fig. 1. Location of observation stations: a) soil and wall benchmarks; b) extensometric boreholes

Из рассматриваемых групп, в первую очередь можно выделить реперы Rp7, Rp8, Rp9, которые находились в положении, позволяющем проследить все стадии подработки на фоне движущегося забоя. Графики оседаний реперов Rp7, Rp8 и Rp9 во времени представлены на рис. 4.

В отмеченной на рисунке области (справа) у реперов Rp8 и Rp9 в марте 2021 года отсутствовал прирост оседаний, по реперу Rp7 видна обратная динамика (репер не просто перестал оседать, но даже несколько поднялся). По данным о компенсационных мероприятиях, в марте 2021 года по зда-

нию №29 по улице «Д» (рис. 2) осуществляли нагнетание компенсационного раствора в скважины, которое и сдерживало рост оседаний на этих реперах. Так же видно, что к лету 2021 года оседания в репере Rp7 стабилизировались и до-

стигли 30 мм, а в реперах Rp8 и Rp9 не превысили 22-23 мм. Соответственно, дополнительные оседания от работ по ССТ по реперу Rp7 достигли 19-20 мм, а в реперах Rp8 и Rp9 не превысили 12-13 мм. Указанное снижение оседаний

(в 1,5-1,7 раза) можно объяснить именно влиянием работ по компенсационному нагнетанию, которые «подхватили» оседания в районе реперов Rp8 и Rp9 в начальной фазе оседаний (в краевой части мульды оседаний), а у Rp7 на активной фазе развития оседаний (в зоне перегиба профиля продольной динамической мульды оседаний).

Кроме указанного эффекта, на графике рис. 4 можно видеть ещё одно менее значимое отклонение от общей закономерности роста оседаний – «скачок» отметок, выделенный малой областью, в июне 2020 г. Он характеризуется увеличением отметок сразу нескольких реперов на 1-3 мм. Здесь необходимо отметить, что деформационный мониторинг одновременно осуществлялся и по экстензометрическим скважинам. Скважины Э12-29А, Э11-29А, Э10-29А располагаются рядом с профильными реперами Rp7, Rp8, Rp9 (рис. 1б). Результаты мониторинга в период с мая по июнь 2020 г. так же показали в скважинах резкий всплеск деформаций. Пример изменения деформаций в этот период в скважине Э12-29А представлен на рис. 5. Причем по скважинам фиксируется, наоборот, резкое увеличение оседаний глубинных реперов. Этот эффект на скважинах можно объяснить подъемом устья скважин: на графиках видно, что все глубинные реперы одновременно пошли вниз, что не может быть объяснено влиянием горных работ (реперы при ведении горных работ оседают последовательно и с разными

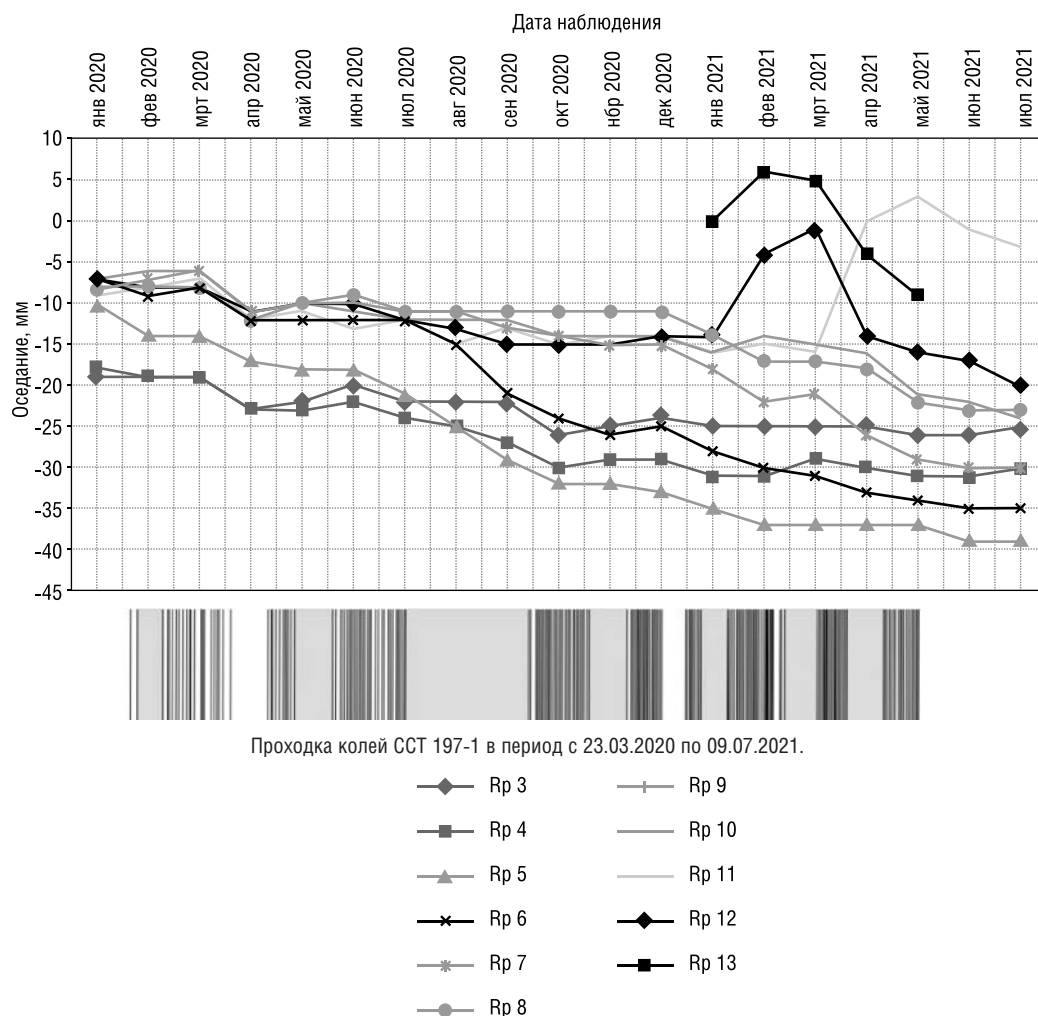


Рис. 3. Оседания профильных реперов и проходка среднего станционного тоннеля ст. «Театральная» /
Fig. 3. Subsidence of profile benchmarks and sinking of the middle station tunnel st. «Theatralnaya»

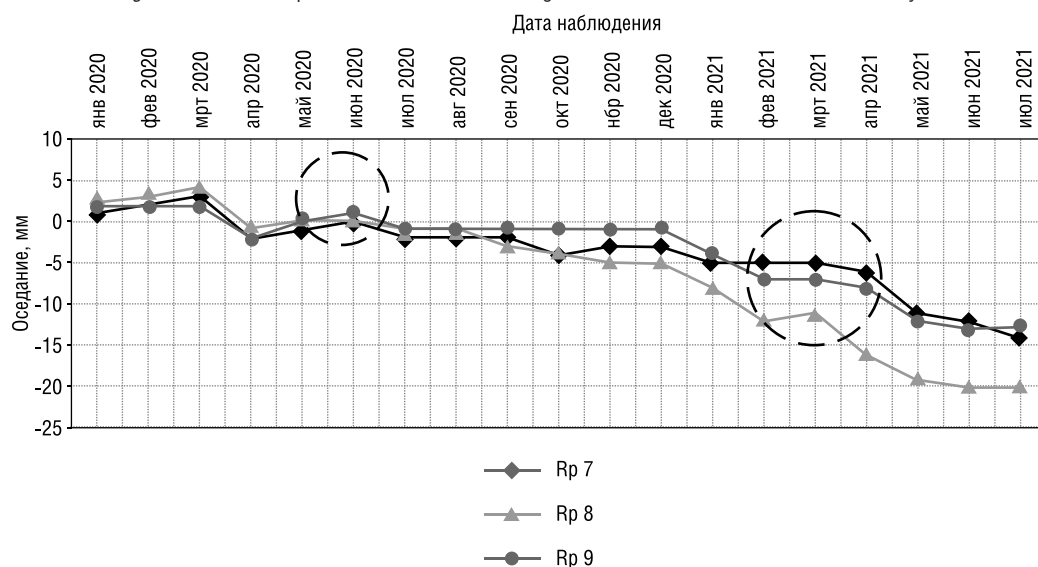


Рис. 4. Оседания реперов Rp7-Rp9 /
Fig. 4. Subsidence of benchmarks Rp7-Rp9

значениями). Очевидно, что здесь работало устье, где размещены все датчики.

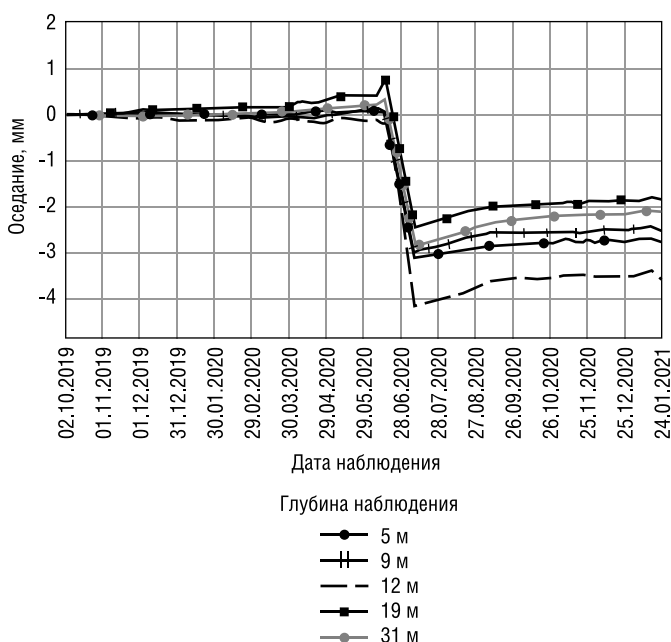


Рис. 5. Развитие деформаций по экстензометрам скважины Э12-29А / Fig. 5. Development of deformations on extensometers of well E12-29A

Попытки объяснить природу этого эффекта навели на необходимость осуществления непрерывного (или высокочастотного, автоматизированного) контроля отметок реперов и устьев скважин, так как контроль оседаний реперов должен учитывать подобные, искажающие картину дефор-

маций, эффекты. К наиболее вероятной причине одновременного «скачка» отметок можно отнести влияние наводнений в результате нагонной волны с Финского залива (рис. 6), когда отметки реперов высотной сети могут увеличиваться на 1-3 мм. В июне уровень в Неве падал до отрицательных абсолютных отметок, а в конце месяца регистрировался резкий подъем уровня. Накопленная статистика по колебаниям отметок деформационных реперов из-за наводнений в Санкт-Петербурге пока не дает возможности однозначно описать эти закономерности, но в дальнейшем, при реализации высокочастотного автоматизированного мониторинга, этот эффект необходимо отдельно исследовать и учитывать в оценках.

В качестве примера эффективности применения компенсационного нагнетания была также рассмотрена группа грунтовых реперов — Rp10 и Rp11. Резкие колебания отметок реперов Rp10 и Rp11 на 10-15 мм вверх (рис. 3) не могут быть объяснены горными работами, по времени они совпадают с периодом активного нагнетания в апреле 2021 года для здания №29 по улице «Д».

Для подтверждения предполагаемых причин нестандартного колебания оседаний профильных реперов Rp10 и Rp11, были дополнительно рассмотрены данные по стенным реперам Rp123, Rp124 расположенные на самом здании, где осуществлялось нагнетание (рис. 7). Главный устойчивый тренд на основной центральной части графиков определяется влиянием движущегося под реперами забоя ССТ.

Можно заметить (рис. 7), что в апреле 2021 года в результате компенсационного нагнетания грунтовые репера поднялись на 10-17 мм, по стенным реперам также было зафиксировано поднятие, но на величину значительно меньшую,

График уровня воды в реке Неве по гидропосту Горный институт, г. Санкт-Петербург

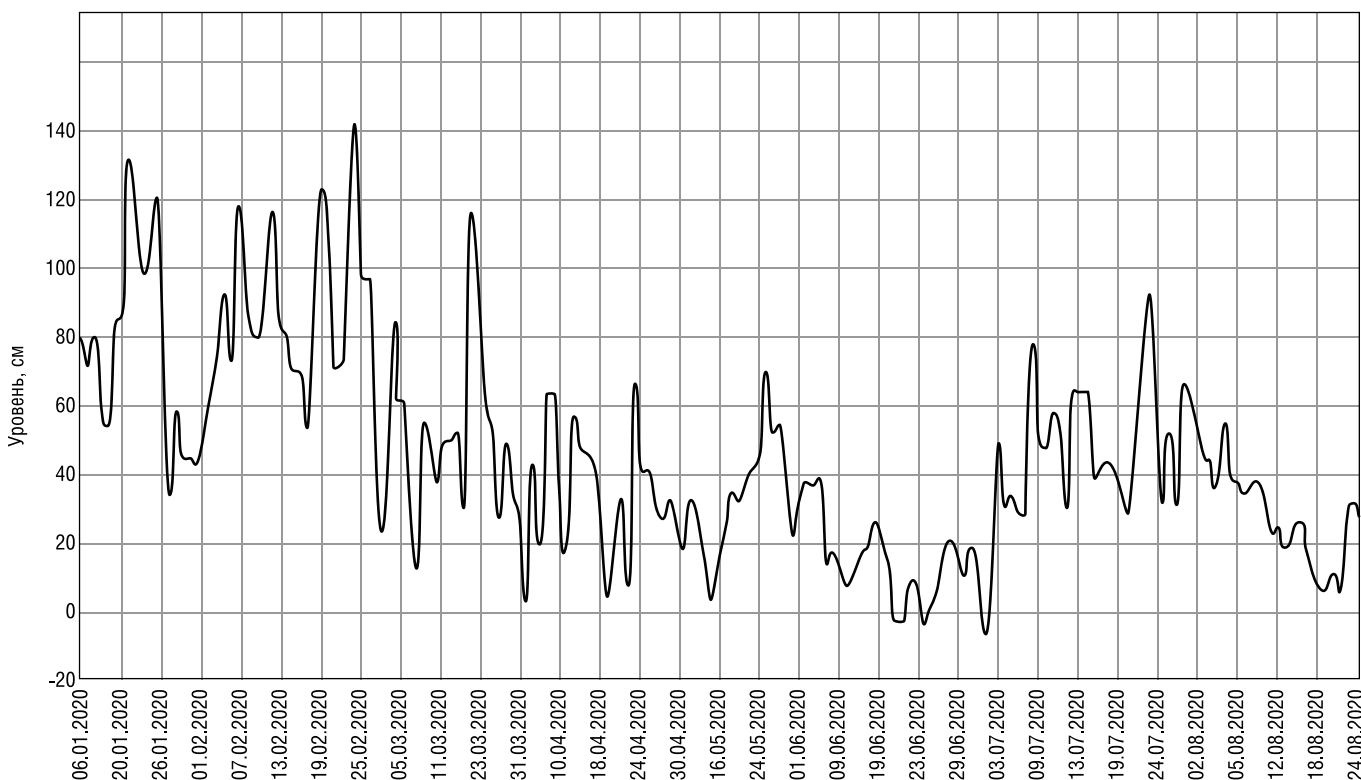


Рис. 6. Изменение отметки уровня воды в Неве в 2020 году [AllRivers.info] / Fig. 6. Change in the sharp water level in the Neva in 2020 [AllRivers.info]

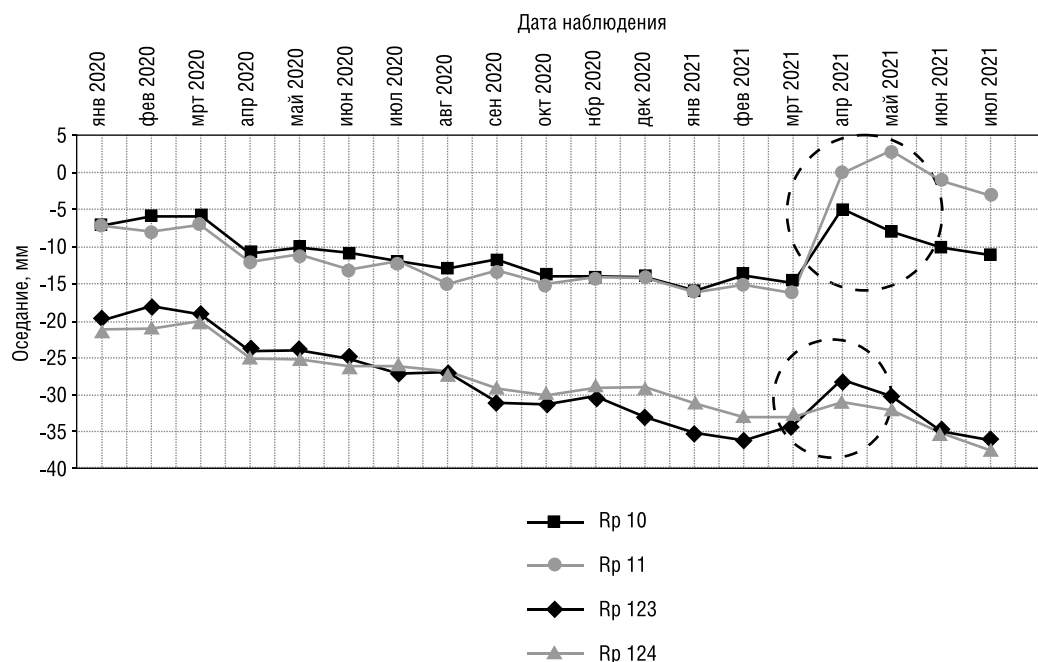


Рис. 7. Оседания реперов Rp10, Rp11 и Rp123, Rp124 /
Fig. 7. Subsidence of benchmarks Rp10, Rp11 and Rp123, Rp124

всего 2-7 мм. Это отчасти свидетельствует о внештатном функционировании системы компенсационного нагнетания, которая призвана компенсировать деформации в массиве под зданием не допуская неравномерных оседаний и снижая показатели деформаций наклона и кривизны, но не генерации поднятий и развития знакопеременных по длине здания деформаций наклона и кривизны, и о её потенциальных возможностях.

Далее были рассмотрены совместные деформации грунтовых и стенных реперов вдоль здания №29 и № 31 по улице «Д» (рис. 8), где можно также увидеть влияние веса и жёсткости здания на параметры оседаний на уровне земной поверхности.

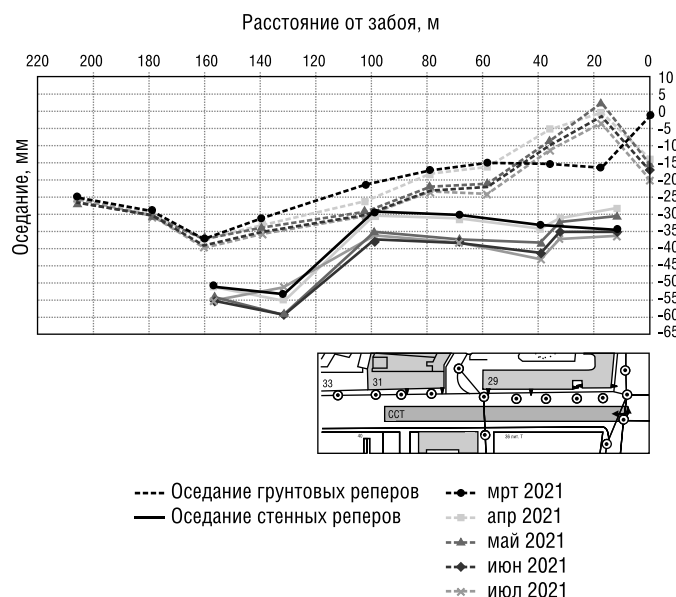


Рис. 8. Оседания по грунтовым и стенным реперам над CCT /
Fig. 8. Subsidence by ground and wall benchmarks over SST

На графиках ярко прослеживается типичный эффект — влияние самих зданий на увеличение оседаний, при этом оседания распределены здесь под зданием более равномерно, чем на земной поверхности, что говорит об уменьшении деформаций кривизны в основании здания в сравнении с деформациями поверхности. Такое снижение может быть связано с влиянием жёсткости и веса здания, сдерживающих развитие деформаций и в самом основании. Однако, указанное снижение (или приращение кривизны) не может рассматриваться как благоприятный признак улучшающий состояние здания, а наоборот

свидетельствуют о том, что несущие элементы испытывают от этого дополнительные (часто не учтенные в расчётах) нагрузки. Анализ такого сложного воздействия требует проведения отдельных натурных и модельных исследований и в данной работе не рассматривается.

В качестве примера работы системы компенсационного нагнетания, приведено распределение кривизны (как второй производной от оседаний) в основании здания №29 по улице «Д» (рис. 9). Можно видеть, что до осуществления мероприятий по нагнетанию, кривизна в основании сооружения колеблется на весьма малых уровнях и редко превышает величины $0,1 \cdot 10^{-4}$ 1/м при планомерном развитии оседаний от проходки CCT. Но после осуществления нагнетания в апреле 2021 года, как было отмечено ранее, начинается резкое поднятие поверхности и зданий, и кривизна в основании здания существенно увеличивается с 0 до $0,15 \cdot 10^{-4}$ 1/м, причём неравномерное поднятие может даже инициировать изменение знака кривизны на противоположный.

Такая смена знаков деформаций и режимов работы здания и основания, например с «сжатия» на «растяжение» и наоборот, может существенно повредить несущие элементы и нарушить работоспособность здания, инициировать развитие трещин в конструкциях [22-24].

Дополнительно была проанализирована динамика перемещения репера Rp12, так как он испытывал существенное поднятие ещё до компенсационного нагнетания, и требовалось объяснить его поведение. Поэтому была проанализирована динамика изменения оседания репера Rp12 и сопоставлена с динамикой по дополнительному профильному реперу Rp13, расположенному напротив, заложенному в декабре 2020 г. На рис. 3 отчётливо видно поднятие реперов до 6-13 мм в начале февраля 2021 года. Для обоснования причин таких смещений реперов Rp12 и Rp13 были рассмотрены колебания температуры воздуха в период с 15.01.21-15.02.21 (рис. 10).

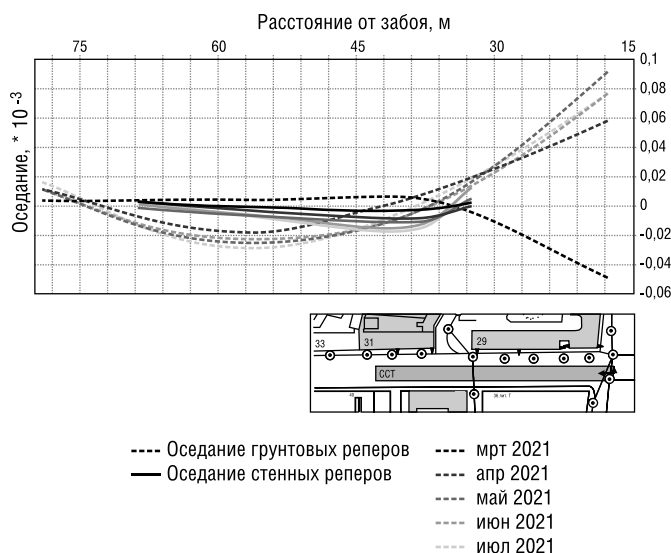


Рис. 9. Распределение деформаций кривизны в основании здания и на земной поверхности / Fig. 9. Distribution of curvature deformations at the base of the building and on the earth's surface

В конце января наблюдалась продолжительная оттепель после новогодних морозов, а затем температура снижалась, что завершилось ее резким падением до $-15-24^{\circ}\text{C}$ на 4-5 февраля, способствующим проявлениям морозного пучения — поднятию реперов. Именно в этот период при деформационном мониторинге наблюдались положительные вертикальные перемещения в реперах Rp 12 и Rp 13 (рис. 3). Важно отметить, что изменение температуры воздуха с января по февраль оказало влияние, в основном на реперы Rp 12 и Rp 13, что можно объяснить более глубоким промерзанием грунтов вблизи набережной Крюкова канала.

Обсуждение результатов

Прямой анализ натуральных наблюдений и сопоставление их с параметрами горных работ на станции «Театральной» не дают возможности выявить отчётливое проявление движущегося забоя: измеренные оседания не стабильны, их развитие по реперам не синхронно и несопоставимо (разные репера по линии вдоль тоннеля сдвигались неоднородно даже при стабильном движении забоя, некоторые репера не оседали, а поднимались). Кроме горных работ и системы компенсационного нагнетания на сдвигание реперов выявлено влияние самих зданий, метеоусловий (морозного пучения на профильные репера) и других факторов. Только разделение реперов на группы со схожими механизмами процессов сдвижения позволял выявить основные техногенные причины изменения отметок реперов и зависимости в этих изменениях.

Анализ оседаний-поднятий по грунтовым и стенным реперам вместе с данными по компенсационному нагнетанию под основание дома №29 по ул. «Д» показал отчетливое влияние нагнетания на процесс оседаний по реперам Rp8 и Rp9, они явно снижались в сравнении с показателями по реперу Rp7, успевшему «набрать» оседания до нагнетания.

На реперах Rp10 и Rp11 в угловой части здания, ближе к Крюкову каналу, проявилось поднятие, причём задолго до подхода забоя ССТ. Сезонными перепадами температур эти поднятия никак не объяснить, зато это хорошо коррелирует с работами по нагнетанию, проводившимися в те же периоды, когда наблюдались поднятия реперов.

Важно отметить, что сопоставление данных по реперам Rp10 и Rp11 с данными по стенным реперам Rp123, Rp124, которые располагались рядом (практически напротив), показало существенную неравномерность поднятий, что определяет весьма неблагоприятное изменение деформационного состояния зданий, при их существенно неравномерном

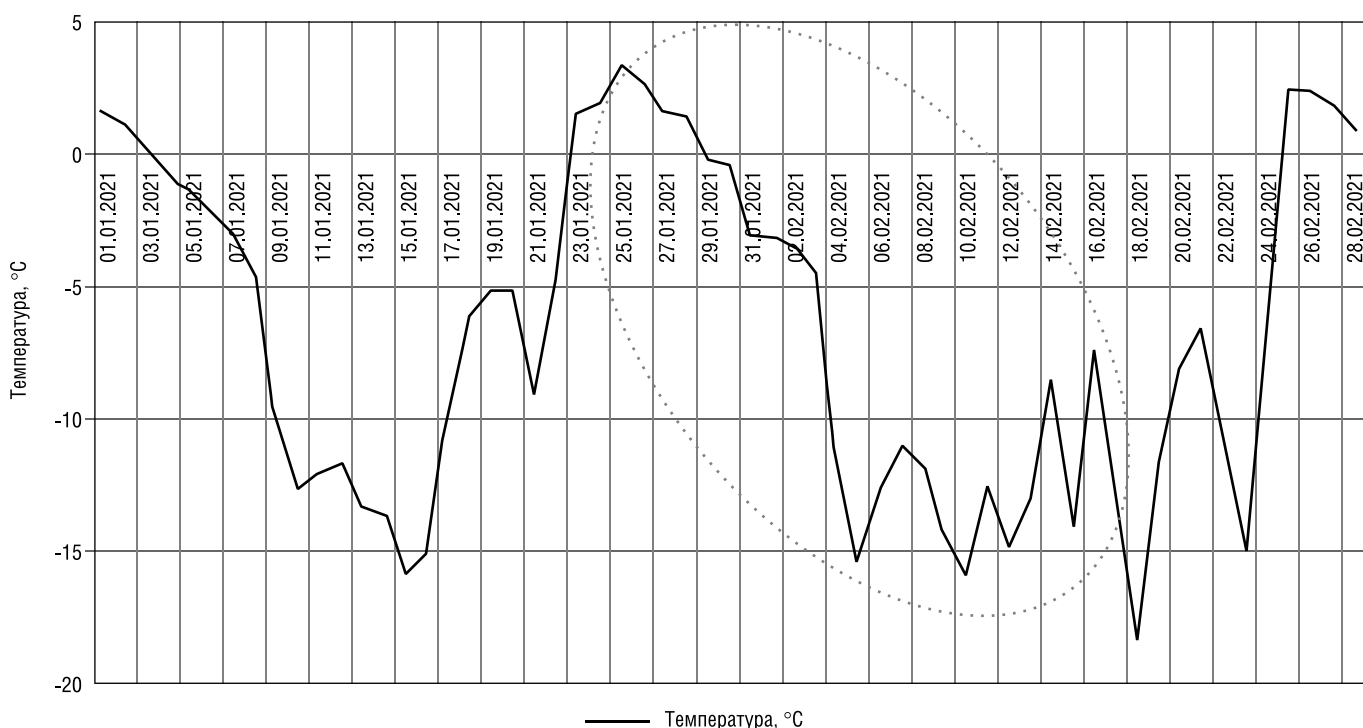


Рис. 10. Изменение температуры наружного воздуха в январе - феврале 2021 года [World-Weather] /

Fig. 10. Outside air temperature change in January - February 2021 [World-Weather]

поднятии. Имеющиеся результаты натурных данных показывают, что техническая реализация системы компенсационного нагнетания на анализируемом объекте для решения задач охраны зданий от деформаций пока не позволяет обеспечить стабильную и удовлетворительную компенсацию деформаций, и даже может повышать риски проявления дополнительных деформаций и повреждений зданий. В условиях отработки новой технологии обеспечения охраны подрабатываемых зданий с использованием компенсационного нагнетания необходимо рассматривать использование усиленного авторского надзора со стороны проектировщика, применение современного автоматизированного маркшейдерско-геодезического контроля [25–29] и геотехнического мониторинга (в режиме «реального времени») [30, 31], а также специального детального технологического, маркшейдерского, контроля генподрядчиком всех работ по нагнетанию, с ведением соответствующей отчетной документации. Учитывая финансовые и репутационные риски повреждения объектов наземной инфраструктуры необходимо также рассматривать специальный научно-технический контроль за этими работами со стороны заказчика метростроения, а в контексте риска возникновения аварийных ситуаций при подработке зданий и сооружений к такому контролю должны подключаться органы Ростехнадзора.

Сравнение данных по профильным реперам на поверхности и стенным реперам показало асинхронность в их оседаниях при движении забоя ССТ: реперы на поверхности оседали последовательно при прохождении забоя, реперы в цоколе в начале не оседали или оседали дискретно (рывками) с задержкой, а в конце начинали повторять тенденцию поверхностных. Это отчетливо свидетельствует о влиянии жесткости зданий, которая сглаживает волну оседаний на поверхности и замедляет развитие оседаний реперов в цоколе, а также косвенно показывает механизм «отработки» зданием волны неравномерных оседаний. Сдерживание зданием оседаний, обеспечивает условия возникновения дополнительных нагрузок на его несущие элементы, которые постепенно нарушаются и здание дискретно отрабатывает деформации от горных работ. Отсутствие видимых вертикальных трещин в верхних этажах на положительной кривизне мулды оседаний в основании здания свидетельствует о преимущественной реализации в рассматриваемом здании сдвиговой схемы деформаций, когда неравномерность оседаний фундамента не приводит к существенным горизонтальным деформациям. Указанный эффект и механизм развития деформаций от цоколя до крыш, характерный также для крупных (выше 4–5 этажей) и развитых в плане исторических зданий на бутовых фундаментах требует отдельного исследования и рассмотрения.

Заключение

Проведенный анализ развития сдвижений и деформаций при сопоставлении с данными о выработках и движении забоев показал, что характер развития деформационных процессов сложен и не определяется одними горными работами по станционным тоннелям на «Театральной». По результатам анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Анализ развития сдвижений и деформаций при движении забоя ССТ показал отчетливое влияние горных работ, однако выявил и проявление факторов не связанных с проходкой ССТ. Характер проявления таких «дополнительных»

эффектов и величина вертикальных сдвижений в основном указывают на наличие внешнего влияния, а не на качество самих измерений (колебания в отметках реперов подтверждаются скважинными измерениями, а сами колебания проявлялись сразу по нескольким реперам и в соизмеримых уровнях), что часто ставится под сомнение непрофильными специалистами.

2. Выявленный «скачок» отметок реперов на несколько миллиметров в начале лета 2020 года подтверждается данными по скважинным экстензометрам, но не может быть объяснен влиянием горных работ и работами по компенсационному нагнетанию. Этот незначительный, но «отчётливый» эффект можно объяснить влиянием природных факторов (например, колебаниями уровня воды в дельте реки Невы), однако он требует дальнейших исследований и анализа влияния на колебания отметок грунтовых и стенных реперов. Для реализации такого анализа необходимо применение современных автоматизированных средств деформационного мониторинга и использование высокочастотных режимов наблюдений.

3. Совместный анализ смещений по грунтовым и стенным реперам вместе с данными по компенсационному нагнетанию под основание дома №29 по ул. «Д» показал отчетливое влияние нагнетания на процесс оседаний: они явно снижались в сравнении с показателями по реперам — аналогам успевшим «сесть» до нагнетания. Данными натурных исследований в районе строительства станции «Театральная» также подтверждаются большие возможности предложенной проектировщиком системы компенсационного нагнетания в части влияния на оседания земной поверхности и самих зданий — система оказалась способна не только сдерживать оседания, связанные с подработкой, но обеспечивать локальные поднятия поверхности и крупных зданий.

4. Отдельно можно отметить и отчетливое влияние самих зданий на оседания и деформации от горных работ и компенсационного нагнетания. Влияние жесткости и веса зданий проявлялось и в «сглаживании» деформаций и в снижении поднятий поверхности под зданиями в 2–4 раза в сравнении с поверхностью около них.

5. Важным результатом проведенной оценки стал вывод о том, что система компенсационного нагнетания по манжетной технологии, при всей её гибкости и широких возможностях не всегда справлялась со своей основной задачей — снижения деформаций от подработки. Работа системы в режиме «поднятия» части здания не просто не соответствует проектному решению, а создаёт условия для возникновения существенных по величине вторичных «наведенных» деформаций в несущих конструкциях здания, причём по схеме знакопеременной динамики (деформации кривизны дважды меняли знак). Уровни таких вторичных деформаций также оказались соизмеримы с деформациями от подработки. При такой несбалансированной реализации системы компенсационного нагнетания задача охраны зданий не всегда может дать положительный результат.

Для повышения технической культуры выполнения таких, технологически сложных, «тонких и высокочувствительных», выверенных по параметрам и времени работ, связанных с обеспечением охраны объектов историко-культурного и архитектурного наследия, часто характеризующихся плохим техническим состоянием охраняемых объектов, не-

приспособленностью к восприятию деформаций, большой ценностью и высокой ответственностью при работах по сохранению, требуется соответствующее техническое и организационное обеспечение для контроля этих работ.

Реализация адекватной и выверенной системы контроля, должна включать:

- ✧ постановку специального авторского надзора со стороны проектировщика, в том числе и в режиме удаленного «онлайн» контроля работ;
- ✧ применение современного, автоматизированного и комплексного маркшейдерско-геодезического и геотехнического мониторинга, обеспечивающего работу в режиме «реального времени»;
- ✧ организацию специального технологического (маркшейдерского) контроля всех работ по нагнетанию и ведения отчетной документации с фиксацией количественных показателей давления и объема нагнетания по всем элементам системы компенсационного нагнетания, учёта динамики горных работ и движения забоев;
- ✧ постановку системы своевременного и качественного геомеханического прогноза и анализа работы элементов компенсационного нагнетания и их «деформационного отклика» на датчиках и реперах в зданиях.

Выводы

1. В статье приведены результаты анализа деформаций земной поверхности при использовании технологии компенсационного нагнетания в качестве меры защиты зданий от вредного влияния горных работ во время строительства ст. м. «Театральная» в городе Санкт-Петербург.

2. Установлено, что при реализации технологии компенсационного нагнетания могут создаваться условия для возникновения вторичных «наведенных» деформаций, в этом случае рассматриваемая система может обеспечивать локальные поднятия земной поверхности и зданий. В связи с этим необходимо организовывать выверенную систему контроля, в которую, в том числе, входит непрерывный маркшейдерско-геодезический и геотехнический мониторинг. Помимо влияния на сдвигание земной поверхности горных работ и компенсационного нагнетания, выявлены дополнительные внешние факторы, которые требуют дальнейших исследований с применением автоматизированных средств деформационного мониторинга.

3. Результаты исследований могут быть полезными при проектировании мер защиты зданий в условиях подработки, а также при организации системы мониторинга за деформациями земной поверхности, зданий и сооружений. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродный К.П., Лебедев М.О., Саммаль А.С. Современный опыт применения теоретических подходов геомеханики в подземном строительстве, базирующихся на методах механики сплошной среды // Метро и тоннели. - 2018. - №4. - С. 20-21.
2. Деменков П.А. Геомеханическая оценка развития мульды оседания земной поверхности при строительстве пилонной станции метрополитена глубокого заложения // Записки Горного института. - 2013. - Т. 204. - С. 220-222.
3. Кондратьева Л.Н., Семенов С.В., Пухаренко Ю.В. Конструктивные системы и материалы исторической жилой застройки Санкт-Петербурга XVIII - начала XX веков // Вестник гражданских инженеров. - 2016. - Т. 69. - № 6. - С. 53-58.
4. Лебедев М.О., Егоров Г.Д. Геотехнические исследования при сооружении эскалаторных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - №10. - С. 146 - 159. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-146-159.
5. Зерцалов М.Г., Симутин А.Н., Александров А.В. Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений // Вестник МГСУ. - 2015. - №6. - С. 32-40. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.6.32-40.
6. Лузин И.Н. Расчет напряженно-деформированного состояния оснований фундаментов в процессе компенсационного нагнетания // Строительство и архитектура. - 2020. - Т 8. - № 1. - С. 33-38. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-1-33- 38.
7. Беллендир Е.Н., Александров А.В., Зерцалов М.Г., Симутин А.Н. Защита и выравнивание зданий и сооружений с помощью технологии компенсационного нагнетания // Гидротехническое строительство. - 2016. - № 2. - С. 15-19.
8. Никифорова И.Л. Исследование динамики сдвижения земной поверхности при строительстве тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №1. - С. 313-317.
9. Никифорова И.Л. Аналитико-экспериментальный метод расчета сдвижения земной поверхности при проходке тоннелей щитовыми комплексами // Маркшейдерия и недропользование. - 2015. - Т. 75. - №1. - С. 37-39.
10. Никифорова И.Л. Совершенствование метода прогноза максимальных оседаний при строительстве транспортных тоннелей в Москве на основе экспериментальных исследований // 50 лет российской научной школе комплексного освоения недр земли: материалы междунар. науч. конф. - М: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 2017. - С. 184-188.
11. Иофис М.А., Гришин А.В. Развитие методов оценки влияния горных работ на подрабатываемые здания и сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2012. - №1. - С. 90-96.
12. Долгих М.В., Волохов Е.М. О влиянии технологии сооружения колонных станций метрополитена Санкт-Петербурга на процесс сдвижения земной поверхности // Записки Горного института. - 2004. - Т. 156. - С. 186-189.
13. Хуцкий В.П. Безопасные параметры сдвижения земной поверхности при строительстве метрополитена в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. - 2012. - Т. 199. - С. 263-268.
14. Мустафин М.Г., Наумов А.С. Определение зоны вредного влияния при строительстве подземных коммуникаций // Записки Горного института. - 2012. - Т. 199. С. 281-285.
15. Мустафин М.Г., Наумов А.С. Контроль допустимых деформаций земной поверхности при строительстве вертикальных выработок в условиях застроенных территорий // Записки Горного института. - 2012. - Т. 198. - С. 194-197.
16. Костенко Б.В. Анализ натурных данных при строительстве эскалаторного тоннеля на станции метро «Спасская» в г. Санкт-Петербурге при помощи тоннелепроходческого механизированного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - №4. - С. 100-115. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_100.

17. Костенко Б.В., Ларионов Р.И. Анализ натурных данных при строительстве эскалаторных тоннелей станций метро «Обводный Канал» и «Адмиралтейская» в г. Санкт-Петербурге при помощи тоннелепроходческого механизированного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 48-64. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_48.
18. Jiang H., Cheng J., Zhang J., Zhang Jingling, Su Y., Zheng Y. Principle and application of in-situ monitoring system for ground displacement induced by shield tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, vol.112, article 103905. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103905.
19. Ларионов Р.И. Геотехнический мониторинг Компенсационных работ для зданий, являющихся памятником архитектуры // Фундаменты. – 2021. – №1. – С. 22 – 29.
20. Лебедев М.О., Карасев М.А., Беляков Н.А. Влияние крепления лба забоя тоннеля на развитие геомеханических процессов в породном массиве // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – №3. – С. 24-32.
21. Соловьев Д.А., Анциферов С.В., Саммал' А.С., Деев П.В. Взаимодействие массива протеразойских глин с опережающей анкерной крепью // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2022. – №1. – С. 363-371. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-363-372.
22. Burd H.J., Yiu W.N., Acikgoz S., Martin C.M. Soil-foundation interaction model for the assessment of tunnelling-induced damage to masonry buildings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, vol. 119, article 104208. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104208.
23. Dalgic K.D., Gulen B., Liu Y., Acikgoz S., Burd H., Marasli M., Ilk A., Masonry buildings subjected to settlements: Half-scale testing, detailed measurements, and insights into behavior. *Engineering Structures*, 2023, vol. 278, article 115233. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115233.
24. Giardina G., DeJong M.J., Chalmers B., Ormond B., Mair R. J. A comparison of current analytical methods for predicting soil-structure interaction due to tunneling. *Tunnelling and underground space technology*, 2018, vol. 79, pp. 319-335. DOI: 10.1016/j.tust.2018.04.013.
25. Wang R., Yang M., Dong J., Liao M. Investigating deformation along metro lines in coastal cities considering different structures with InSAR and SBM analyses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 115, 2022, article 103099. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103099.
26. Хатум Х.М., Мустафин М.Г. Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – С. 2 – 13. DOI:10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13.
27. Yang H., Xu X. Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure. *Composite Structures*, vol. 276, 2021, article 114565. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114565.
28. Гусев В.Н., Выстрчил М.Г. Способ определения вертикальных сдвижений и деформаций с помощью лазерно-сканирующих систем // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 245-248.
29. Афонин Д.А., Кавказский В.Н., Никитчин А.А. Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки тоннелей // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19. – №3. – С. 432 – 443. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443.
30. Мамаев Д.С., Бугаков П.Ю. Разработка программного обеспечения для геодинамического и геотехнического ГНСС мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – №2. – С. 114 – 119.
31. Колотовичев Ю.А., Шахрамьян А.М. Автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций «Екатеринбург Арены» // Вестник МГСУ. – 2022. – Т.17. – №3. – С. 314-330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330.

REFERENCES

1. Bezrodnyy K.P., Lebedev M.O., Sammal' A.S. Modern experience in the application of theoretical approaches of geomechanics in underground construction, based on the methods of continuum mechanics. *Metro i tonneli*. 2018, no 4, pp. 20-21.
2. Demenkov P.A. Geomechanical analysis of surface settlement trough development due to construction of deep underground pillar station. *Journal of Mining Institut*. 2013, vol 204, pp. 220-222.
3. Kondratyeva L.N., Sementsov S.V., Pukharensko Yu.V. Construction systems and materials of the historical residential estate development in Saint-Petersburg referring to the period from the XVIII century to the beginning of the XX century. *Bulletin of Civil engineers*. 2016, vol. 69, no. 6, pp. 53-58.
4. Lebedev M.O., Egorov G.D. Geotechnical monitoring in construction of escalator tunnels. *Mining informational and analytical bulletin*. 2019, no. 10, pp. 146-159. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10- 0-146-159.
5. Zertsalov M.G. Simutin A.N., Aleksandrov A.V. Application of compensation grouting technology for protection of buildings and structures. *Vestnik MGSU*. 2015, no.6, pp. 32-40. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.6.32-40.
6. Luzin I.N. Calculation of the foundation settlement during compensation grouting. *Construction and Architecture*. 2020, vol. 8, no. 1, pp. C. 33-38. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-1-33- 38.
7. Bellendir, E.N., Aleksandrov, A.V., Zertsalov, M.G., & Simutin, A.N. Protection and alignment of buildings and structures using the technology of compensatory injection. *Hydro-engineering Construction*. 2016, no. 2, pp. 15-19.
8. Nikiforova I.L. Investigation of the dynamics of movement of the surface during the construction of tunnels. *Mining informational and analytical bulletin*. 2011, no. 1, pp. 313-317.
9. Nikiforova I.L. The analytical and experimental method for computation of crustal movements caused by blade-shield tunneling. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2015, vol. 75, no. 1, pp. 37-39.
10. Nikiforova I.L. Improvement of the method of forecasting maximum subsidence during the construction of transport tunnels in Moscow based on experimental studies. 50 years of the Russian scientific school of integrated development of the Earth's interior: materials of the international scientific conference. Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences. 2017, pp. 184-188.
11. Iofis M.A., Grishin A.V. Development of methods for assessing the impact of mining operations on part-time buildings and structures. *Mining informational and analytical bulletin*. 2012, no. 1, pp. 90-96.

12. Dolgikh M.V., Volokhov E.M. On the influence of the technology of construction of column stations of the St. Petersburg metro on the process of displacement of the Earth's surface. *Journal of Mining Institut.* 2004, vol. 156, pp. 186-189.
13. Khutsky V.P. Safe parameters for shifting of the earth surface at constructing of metropolitan railway in Saint-Petersburg. *Journal of Mining Institut.* 2012, vol. 199, pp. 263-268.
14. Mustafin M.G., Naumov A.S. Definition of area harmful interference in communications construction underground. *Journal of Mining Institute.* 2012, vol. 199, pp. 281-285.
15. Mustafin M.G., Naumov A.S. Controls allowed earth deformation construction vertical openings in built-up area. *Journal of Mining Institute.* 2012, vol. 198, pp. 194-197.
16. Kostenko B.V. Field data analysis in construction of escalator tunnel at Spasskaya Station of the Saint-Petersburg Metro using tunnel boring machine. *Mining informational and analytical bulletin.* 2022, no. 4, pp. 100-115. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_100.
17. Kostenko B.V., Larionov R.I. Field data analysis in construction of escalator tunnels at Obvodny Kanal and Admiralteyskaya Stations of the Saint-Petersburg Metro using tunnel boring machine. *Mining informational and analytical bulletin.* 2021, no. 9, pp. 48-64. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_48.
18. Jiang H., Cheng J., Zhang J., Zhang Jingling, Su Y., Zheng Y. Principle and application of in-situ monitoring system for ground displacement induced by shield tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, vol.112, article 103905. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103905.
19. Larionov R.I. Geotechnical monitoring of Compensation works for buildings that are architectural monuments. *International Association of Foundation Contractors.* 2021. no 1. pp. 22 - 29.
20. Lebedev M.O., Karasev M.A., Beliaikov N.A. The Influence of the Front of the Tunnel Face Support on the Development of Geomechanical Processes at Rock Massif. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii.Gornyi zhurnal.* 2016, no. 3, pp. 24-32.
21. Soloviev D.A., Antsiferov S.V., Sammal A.S., Deev P.V. Interacting massif of proterozoic clays with advanced anchor lining. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle.* 2022. no. 1, pp. 363-371. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-363-372.
22. Burd H.J., Yiu W.N., Acikgoz S., Martin C.M. Soil-foundation interaction model for the assessment of tunnelling-induced damage to masonry buildings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, vol. 119, article 104208. DOI: 10.1016/j.tust.2021.104208.
23. Dalgic K.D., Gulen B., Liu Y., Acikgoz S., Burd H., Marasli M., Ilk A., Masonry buildings subjected to settlements: Half-scale testing, detailed measurements, and insights into behavior. *Engineering Structures*, 2023, vol. 278, article 115233. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115233.
24. Giardina G., DeJong M.J., Chalmers B., Ormond B., Mair R. J. A comparison of current analytical methods for predicting soil-structure interaction due to tunneling. *Tunnelling and underground space technology*, 2018, vol. 79, pp. 319-335. DOI: 10.1016/j.tust.2018.04.013.
25. Wang R., Yang M., Dong J., Liao M. Investigating deformation along metro lines in coastal cities considering different structures with InSAR and SBM analyses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 115, 2022, article 103099. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103099.
26. Khatum Kh.M., Mustafin M.G. Optimization of the location of robotic stations for observing deformations of buildings and structures. *Geodesy and Cartography*, 2020, vol. 81. pp. 2-13. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13.
27. Yang H., Xu X. Structure monitoring and deformation analysis of tunnel structure. *Composite Structures*, vol. 276, 2021, article 114565. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114565.
28. Gusev V.N., Vystrchil M.G. Method for determining the vertical and strain displacement using laser-scanning systems. *Journal of Mining Institute.* 2012, vol. 199. pp. 245-248.
29. Afonin D.A., Kavkazskiy V.N., Nikitchin A.A. Operational Geodetic Check of Bottom-Hole Zone Deformations at Innovative Tunneling // *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2022, vol. 19, no. 3. pp. 432 - 443. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443.
30. Mamaev D.S., Bugakov P.Yu. Software development for geodynamic and geotechnical GNSS monitoring. *Interexpo GEO-Siberia.* 2021, no. 2, pp. 114 - 119.
31. Kolotovich Yu.A., Shakhramanyan A.M. An automated structural health monitoring system developed for Ekaterinburg Arena. *Vestnik MGSU.* 2022, vol. 17, no. 3, pp. 314-330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волохов Евгений Михайлович:

кандидат технических наук,
доцент,
<https://orcid.org/0000-0003-4430-4172/>
Scopus Author ID: 57196221055,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: volohov@spmi.ru

Кожухарова Василина Константиновна:

аспирант кафедры маркшейдерского дела,
<https://orcid.org/0009-0008-0705-3646>,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: me@kozhuharova.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volokhov Evgeny Mikhailovich:

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0003-4430-4172/>
Scopus Author ID: 57196221055,
Saint Petersburg Mining University,
Saint Petersburg, Russia,
e-mail: volohov@spmi.ru

Kozhukharova Vasilina Konstantinovna:

postgraduate student of the Department of Mining Surveying,
<https://orcid.org/0009-0008-0705-3646> ,
St. Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
e-mail: me@kozhuharova.ru

Волкотруб Алина Эдуардовна:

менеджер,
ООО «ГК Уровень»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: volkotrub4@gmail.com

Volkotrub Alina Eduardovna:

manager,
GC Uroven LLC, 1
St. Petersburg, Russia,
e-mail: volkotrub4@gmail.com

Назмутдинов Линар Маратович:

заместитель начальника управления по строительству
метрополитена,
СПб ГКУ «Дирекция транспортного строительства»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: nazmutdinov@spbdorogi.ru

Nazmutdinov Linar Maratovich:

Deputy Head of the Metro Construction Department,
SPb GCU «Directorate of Transport Construction»,
St. Petersburg, Russia,
e-mail: nazmutdinov@spbdorogi.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.



КАЗАНСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Информируем Вас

Подготовка студентов в Институте геологии и нефтегазовых технологий ведется по 2-м направлениям:

05.03.01 Геология и 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Контакты : 420008, Казань, Кремлевская 4/5, Институт геологии нефтегазовых технологий

Тел/факс: (843) 233-71-61. E-mail: geofak@kpfu.ru



WWW.N-GN.RU



**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ)**

Информируем Вас

Университет берет свое начало с геологоразведочного факультета
Московской горной академии, созданной в сентябре 1918 г.

Факультеты:

- ◆ Геологоразведочный факультет,
- ◆ Факультет технологии разведки и разработки,
- ◆ Факультет геологии и геофизики нефти и газа,
- ◆ Гидрогеологический факультет,
- ◆ Факультет экономики и управления,
- ◆ Экологический факультет

Для зачисления в Университет в 2022 году необходимо подать заявление о согласии на зачисление и оригинал документа
об образовании не позднее 18 часов 28 июля 2022 года.

Контакты : 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; +7(495)255-40-20 10:00-18:00 e-mail: priem@mgri.ru,
<https://www.mgri.ru/commission/poryadok-postupleniya/>



WWW.N-GN.RU