

# **Геотехнический мониторинг компенсационных работ для зданий, являющихся памятниками архитектуры**

## **Введение**

Метрополитен в Санкт-Петербурге в основном глубокого заложения, т.к. устойчивые необводнённые грунты в центре города располагаются на глубине более 40 м. В ходе строительства станционных комплексов возникают смещения поверхности земли на площади в несколько гектаров городской территории. И чем больше глубина заложения, тем большую площадь охватывает мульда оседания. В особенности такая ситуация неприемлема в центре города, где расположено большое количество памятников архитектуры.

Существующая в настоящее время технология строительства станционных узлов метрополитена и наклонных ходов приводит к существенным деформациям вышележащей толщи грунта и расположенных на ней зданий и сооружений.

Не смотря на большое поперечное сечение станционных узлов в целом, большое количество этапов строительства до раскрытия станционного узла на полное сечение, применение большого объёма ручного труда при разработке забоев и крепления выработок, применение специальных способов оказывает влияние на уменьшение деформаций поверхности. Но их недостаточно для того, чтобы соблюсти требования нормативной документации по абсолютным и относительным деформациям зданий.

Уменьшить деформации земной поверхности возможно посредством применения комплекса мероприятий на поверхности земли, компенсирующих осадку зданий и сооружений.

## **Специальные технические условия**

Для определения нормируемых показателей деформаций оснований и фундаментов сооружений, расположенных в зоне влияния строительства подземных объектов метрополитена, и мероприятий, предотвращающих деформации, в ОАО «ЛМГТ» были разработаны специальные технические условия (СТУ) на проектирование и строительство Лахтинско-Правобережной линии петербургского метрополитена.

В СТУ был определён перечень работ по сохранности зданий и сооружений:

- геотехнические расчёты с определением мульды оседания дневной поверхности в соответствии со СП 21.13330.2012;
- обследование зданий, попадающих в зону, ограниченную нулевой линией мульды, с целью определения их технического состояния;
- разработка компенсационных мероприятий с условием недопущения достижения предельной разности осадок;
- проведение геотехнического мониторинга во время строительства подземных сооружений и мероприятий, предусмотренных в проектах усиления и в составе ПОС.

Деформации считаются допустимыми в том случае, если параметры мульды оседания не превышают величин относительной разности осадок. В случае превышения регламентированных величин в составе проекта разрабатывались мероприятия по их предотвращению.

Выполненные геотехнические расчеты и обследование зданий в зоне влияния строительства, показали, что для некоторых зданий абсолютные и относительные величины осадок превышают допустимые. Для этих зданий были разработаны проекты мероприятий, компенсирующих осадки.

### Сведения о зданиях, подлежащих компенсационным мероприятиям

В ходе проектирования участка Лахтинско-Превобережной линии были определены мутьды смещения земной поверхности, в которые попали здания исторической застройки и памятники архитектуры, относительные деформации фундаментов которых превысили допустимые. Так, в расчётную мутьду оседания (рис. 1) от строительства ст. «Театральная» попали четыре здания (рис. 1), расположенные по ул. Декабристов рядом со 2-й сценой Мариинского театра, два из которых являются объектами КГИОП (Комитет по государственному контролю, использованию и охране памятников истории и культуры). Это д. 36/1, лит. А (оси 22-24) – дом Кокушкина, 1843г. постройки и д. 29, лит. А – жилой дом работников Союзверфи, 1934г. постройки.

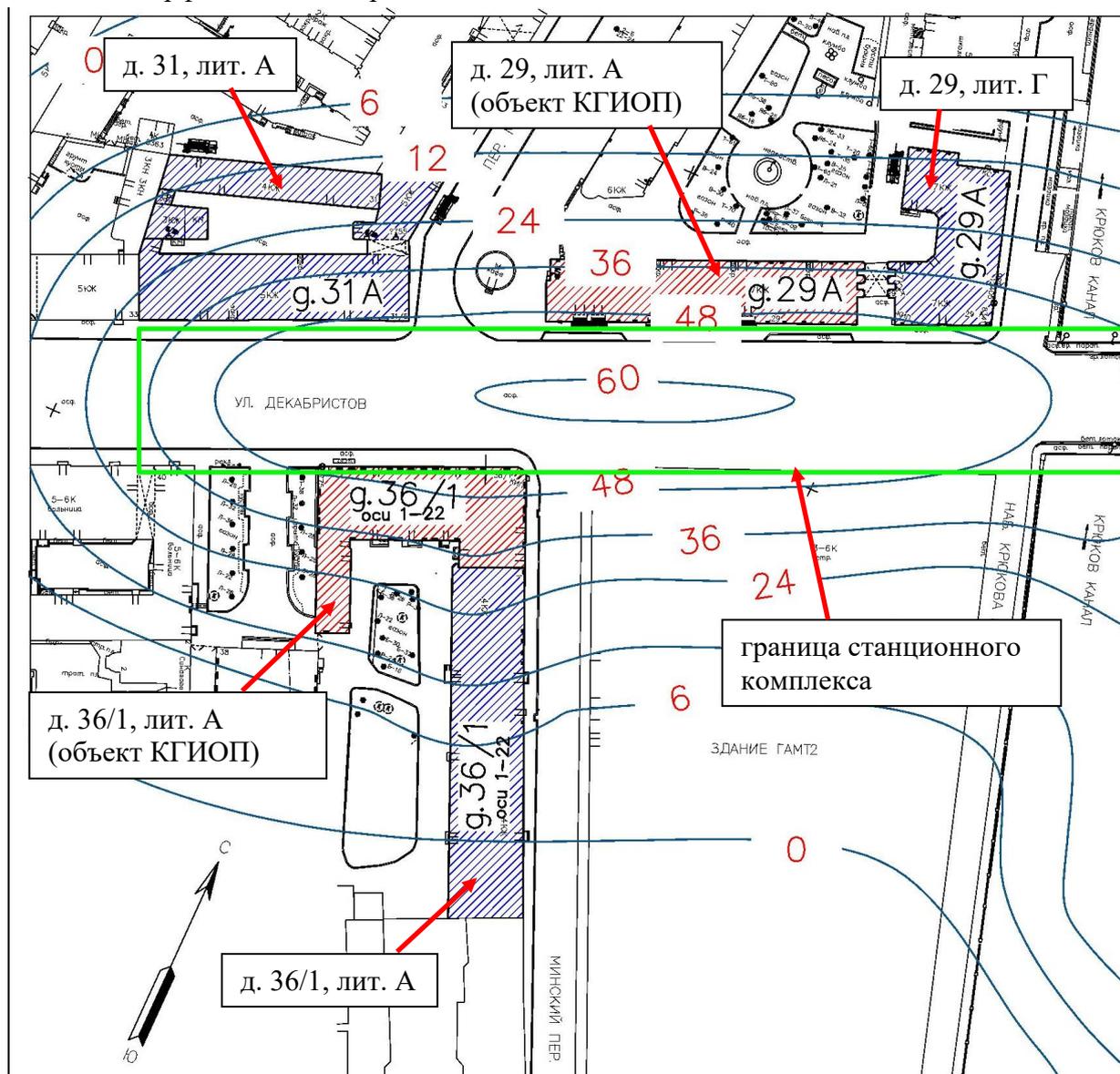


Рисунок 1 – Здания, подлежащие компенсационным мероприятиям, попадающие в мутьду оседания при строительстве ст. «Театральная»

Здания по ул. Декабристов являются жилыми, высотой от 3 до 7 этажей, постройки 2-й половины XIXв – начала XX в. Фундамент ленточный, бутовый, глубиной заложения до 3 м; стены кирпичные. В домах №36/1, лит. А (оси 22-24) и №31, лит. А подвал отсутствует.

По результатам обследований было дано заключение, что все здания относятся к III категории технического состояния согласно ТСН 50-302-2004 (табл. Б1). Поверочные расчёты показали, что давление под подошвой фундаментов по некоторым осям зданий превышает расчётное сопротивление грунта, поэтому требуются мероприятия по усилению грунтов основания.

### **Мероприятия по предотвращению развития деформаций фундаментов зданий**

Для вышеуказанных зданий в рамках проектирования объектов метрополитена были предложены мероприятия по недопущению развития критических осадок дневной поверхности.

На основе опыта проведения работ в Санкт-Петербурге с 1995 по настоящее время по укреплению фундаментов, стабилизации грунтов оснований и компенсационным работам инъекционными способами на объектах различного назначения, а также с учётом требований сводов правил, стандартов и других руководящих документов в качестве метода по предотвращению осадок поверхности при строительстве метрополитена был выбран метод компенсационной инъекции.

Одним из последних объектов, на котором применялась рассматриваемая технология применительно к метростроению, было строительство эскалаторного тоннеля станции «Адмиралтейская» при помощи ТПК в 2010 – 2011 гг. В район с максимальными расчетными деформациями поверхности попадало здание по адресу Кирпичный переулок д.4.

Максимальные расчетные деформации для здания по адресу Кирпичный переулок д.4 составили 26 мм. Причем по периметру здания эти деформации составляли от 10 до 26 мм.

В соответствии с полученными результатами наблюдений деформации по периметру рассматриваемого здания составили 10-13 мм.

Исходя из положительного опыта применения компенсационного нагнетания, для компенсации ожидаемых деформаций фундаментов зданий при строительстве станций Лахтинско-Правобережной линии была выбрана именно эта технология.

Проект предполагает устройство компенсационных скважин по периметру снаружи зданий в 2 ряда с шагом 1 м и в их подвалах (при наличии) с шагом 1,2 м по периметру стен и по сетке с шагом 2,0 м внутри зданий. Расстояние между рядами скважин снаружи зданий – 0,65 м. 2-й ряд скважин имеет наклон 10° в сторону зданий. 3-й ряд скважин, расположенный под углом 40°, предусмотрен по зданиям, в которых отсутствует подвал, для возможности укрепления грунта под средней стеной (рис. 2).

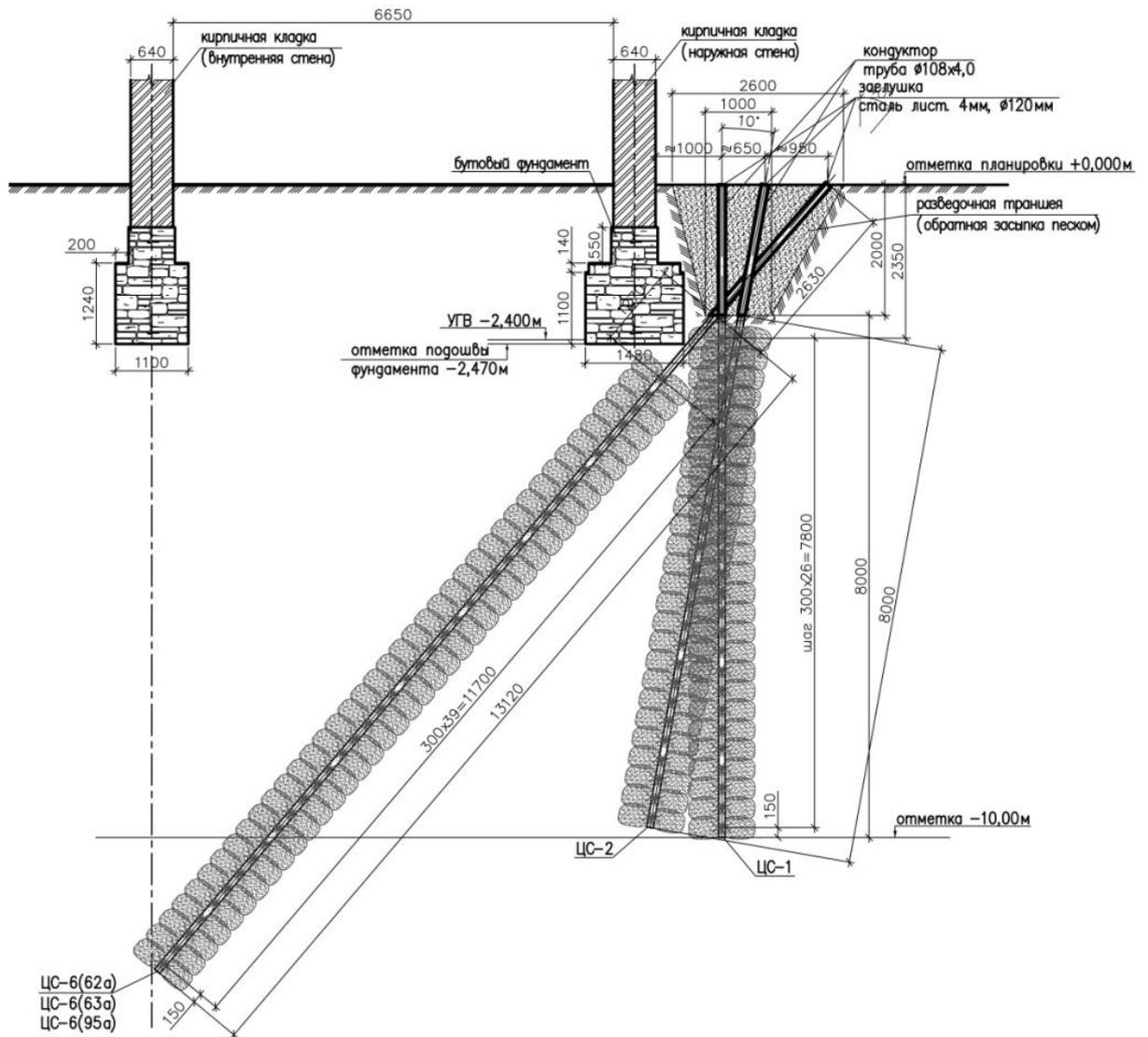


Рисунок 2 – Компенсационные скважины (профиль)

Скважины  $\Phi 93$ мм бурились на глубину 10 м с промывкой глинистым раствором, и в них устанавливались манжетные колонны – пластиковые трубы  $\Phi 63$ мм с перфорацией по контуру, выполненную с шагом 300 мм и закрытую резиновыми манжетами, выполняющими функцию выпускного клапана при нагнетании раствора. Нижний торец манжетных колонн герметизирован пробкой. Манжетные колонны омоноличиваются в скважинах обойменным раствором.

По истечению времени затвердевании обойменного раствора в заданном интервале манжетной колонны устанавливается пакер, подсоединяется к скважине нагнетательная система и осуществляется инъекция укрепляющего раствора в грунт. Затем пакер переставляют на следующий интервал, снова нагнетают раствор и т.д. Направление инъекции может быть как восходящим, так и нисходящим, при этом возможно возвращение на любой интервал. Проектом предусмотрено повторное использование скважин, для чего после нагнетания выполняется их промывка.

Нагнетание выполняется как в режиме пропитки грунта (песчаные), так и гидроразрыва (глинистые).

Вначале выполняются работы на опытном участке, состоящем из 4-5 скважин, для уточнения технологических параметров. Контроль параметров осуществляется геофизическими методами. После оснащения компенсационных скважин манжетными колоннами выполняется 1-й этап геофизических работ для выявления начальных физико-механических свойств грунта (модуль упругости). После нагнетания раствора во все 5 скважин осуществляется второй этап геофизических работ и определяется качество распространения нагнетаемых растворов и изменение деформационно-прочностных свойств массива.

Аналогичный комплекс работ осуществляется и из подвалов зданий с той лишь разницей, что разведочная траншея не откапывается, а кондуктора устанавливаются в период армирования фундаментной плиты.

Порядок нагнетания в инъекционные скважины определяется по результатам геотехнического мониторинга.

### **Геотехнический мониторинг**

Все работы по предотвращению деформаций фундаментов зданий на подрабатываемой территории ведутся в сопровождении геотехнического мониторинга. С этой целью в ОАО «ЛМГТ» была разработана программа геотехнического мониторинга в составе проекта по компенсационным мероприятиям, которая включает в себя несколько видов работ:

- мониторинг вертикальных деформаций грунтового массива с использованием экстензометров;
- инженерно-геофизические работы по контролю качества инъекционного упрочнения грунтов в основаниях зданий;
- геодезический контроль деформаций оголовков экстензометрических скважин;
- визуальный мониторинг зданий.

Мониторинг вертикальных деформаций грунтового основания под зданиями посредством экстензометров предназначен для определения момента начала компенсационных работ, контроля процесса нагнетания раствора и окончания этих работ.

До начала строительства стационарного комплекса и компенсационных мероприятий выполняется бурение экстензометрических скважин по периметрам зданий с установкой в них экстензометров на разных уровнях. Всего проектом предусмотрено 46 скважин. В скважины устанавливаются глубинные грунтовые репера (рис. 3) и заполняются специальным раствором, близким по физико-механическим свойствам к грунтовому массиву. На оголовки скважин устанавливаются антивандальные шкафы, в которых монтируется оборудование, выполняющее измерения и передачу данных на выделенный интернет-портал.

Информация, поступающая с экстензометров, оперативно обрабатывается и, в зависимости от показаний выдаётся команда на начало компенсационных мероприятий. При фиксации глубинных смещений и прогноза развития неравномерных осадок здания подрядчик, выполняющий компенсационные мероприятия, незамедлительно оповещается, и выдаётся команда на начало компенсационных мероприятий. При этом определяется количество компенсационных скважин и порядок нагнетания в них, включая скважины как по периметру здания, так и внутри. Нагнетание выполняется по скважинам, расположенным в ряд и по нормали к направлению развития мульды оседания поверхности.

После окончания цикла работ осуществляется этап геофизического контроля грунтового массива с выдачей интерпретационного геологического разреза грунтов оснований. Для недопущения превышения относительной разности осадок объёмы компенсационного нагнетания назначаются с учётом интерполяции показаний экстензометров по всем скважинам и геодезического мониторинга.

Инженерно-геофизические работы по контролю качества компенсационных работ включают в себя такие методы, как сейсмоакустика, сейсморазведочный метод преломленных волн, сейсмодосвечивание между скважинами, георадиолокация.

Целью геодезического мониторинга является контроль вертикальных смещений оголовков экстензометрических скважин для определения суммарных вертикальных смещений грунтовых реперов.

Визуальный мониторинг осуществляется с целью получения необходимых данных об изменении эксплуатационного состояния конструкций зданий в целом и фиксирования отдельных дефектов в период строительства. Визуальный мониторинг включает в себя: осмотр конструкции зданий, фотофиксацию дефектов конструкций, определение фактических размеров дефектов, качественный характер их изменения в период сооружения станционного комплекса и выдачу рекомендации о необходимости инструментального контроля развития дефектов.

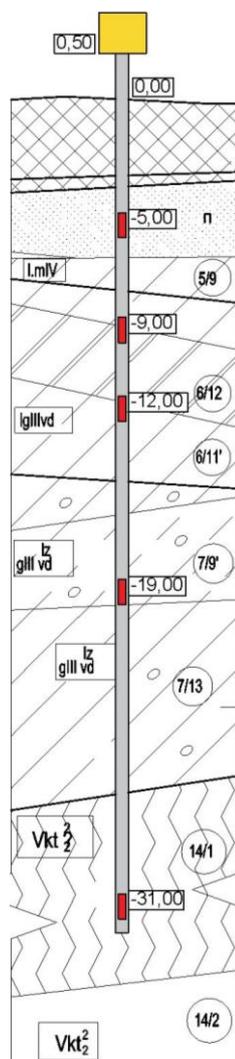


Рисунок 3 – Схема размещения глубинных реперов в экстензометрической скважине

## Реализация проекта

Летом 2019г. было выполнено опытное нагнетание на опытных участках домов №31, лит. А и №36/1, лит. А.

Нагнетание на опытном участке д.31, лит. А производилось 02.07.2019 и 03.07.2019 в 5 вертикальных скважин №№ 229, 231, 233, 235 и 237, расположенных вблизи экстензометрической скважины Э1-31А (рис. 4). В 10 горизонтов, расположенных в интервале от м. -5м – -2м нагнеталось по 100л раствора в каждый горизонт во все 5 скважин. Первоначальный состав раствора включал в себя на 1 м<sup>3</sup>:

- цемента – 1200 кг;
- воды – 560 л;
- жидкого стекла – 9,6 кг;
- суперпластификатора С-3 – 2 кг.

Последовательность нагнетания была выбрана от дальней от экстензометрической скважины манжетной колонны (№229) к ближней (№237) с целью проследить изменение влияния нагнетания на показания экстензометров. Последовательность нагнетания в манжетной колонне была выбрана последовательно от нижнего горизонта к верхнему.

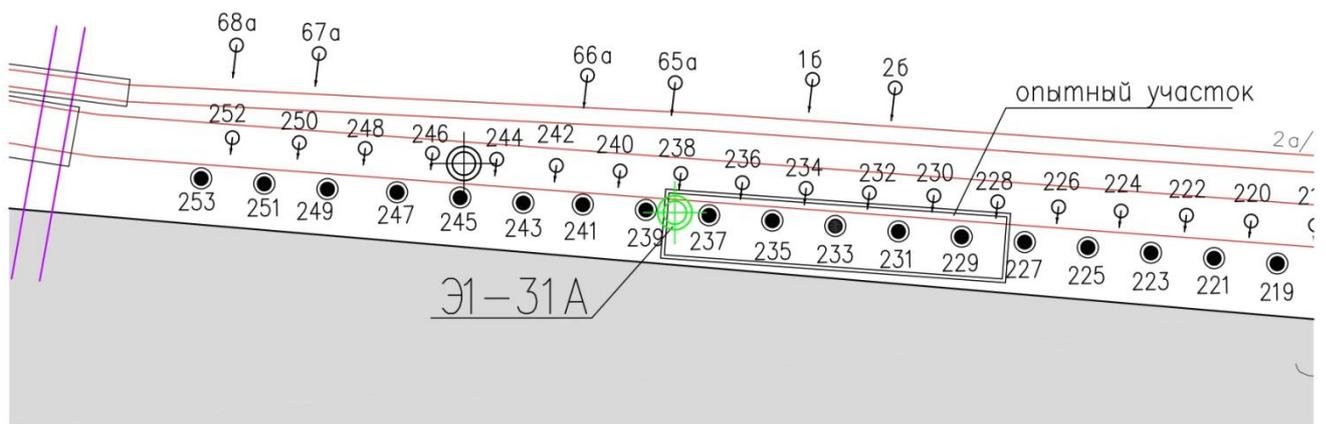


Рисунок 4 – План опытного участка по д.31, лит. А

Хронология нагнетания показана в табл. 1.

Таблица 1 – Порядок и параметры инъекционных работ на опытном участке д.31, лит. А.

Номер скважины	Начало нагнетания	Окончание нагнетания	Количество раствора на горизонт	Рецептура раствора, на 1 м?	Примечание
02.07.2019					
229	14.05	14.50	100л	цемент - 1200 кг; вода - 560 л; жидкое стекло - 9,6 кг; С-3 - 2 кг	
231	14.55	15.45	100л		В 1-й горизонт прокачали 190л, 5 мин
233	15.48	15.57	100л		При прокачке в 3-й снизу горизонт наблюдался выход раствора на поверхность снаружи кондуктора скв. 234. Прокачка остановлена
235	-	-	-		
237	16.00	16.03	100л		При прокачке во 2-й снизу горизонт наблюдался выход раствора на поверхность через скв. 231
Остаток раствора закачивали в нижний горизонт скв.243. Наблюдался выход раствора на поверхность возле экстензометрической скважины Э1-31А					
03.07.2019					
233	11.10	11.30	100л	цемент - 1200 кг; вода - 560 л; жидкое стекло - 9,6 кг; С-3 - 2 кг	Продолжено нагнетание, начиная с 4-го снизу горизонта
235	11.35	12.30	100л		В 12.00 произошла закупорка шланга на 5 горизонте. В 12.10 продолжено нагнетание
237	10.45	11.05	100л		На 8-м снизу горизонте выход раствора у наклонных скважин 65а и 16
Остаток раствора (200л) закачивали в горизонт на глубине 10м скв. 66а - наблюдался выход раствора у кондуктора. Пакер переставили на горизонт 4м - то же самое					

На рис. 5 показан график развития деформаций по экстензометрам скважины Э1–31А за период производства опытного нагнетания в течение 2 суток.

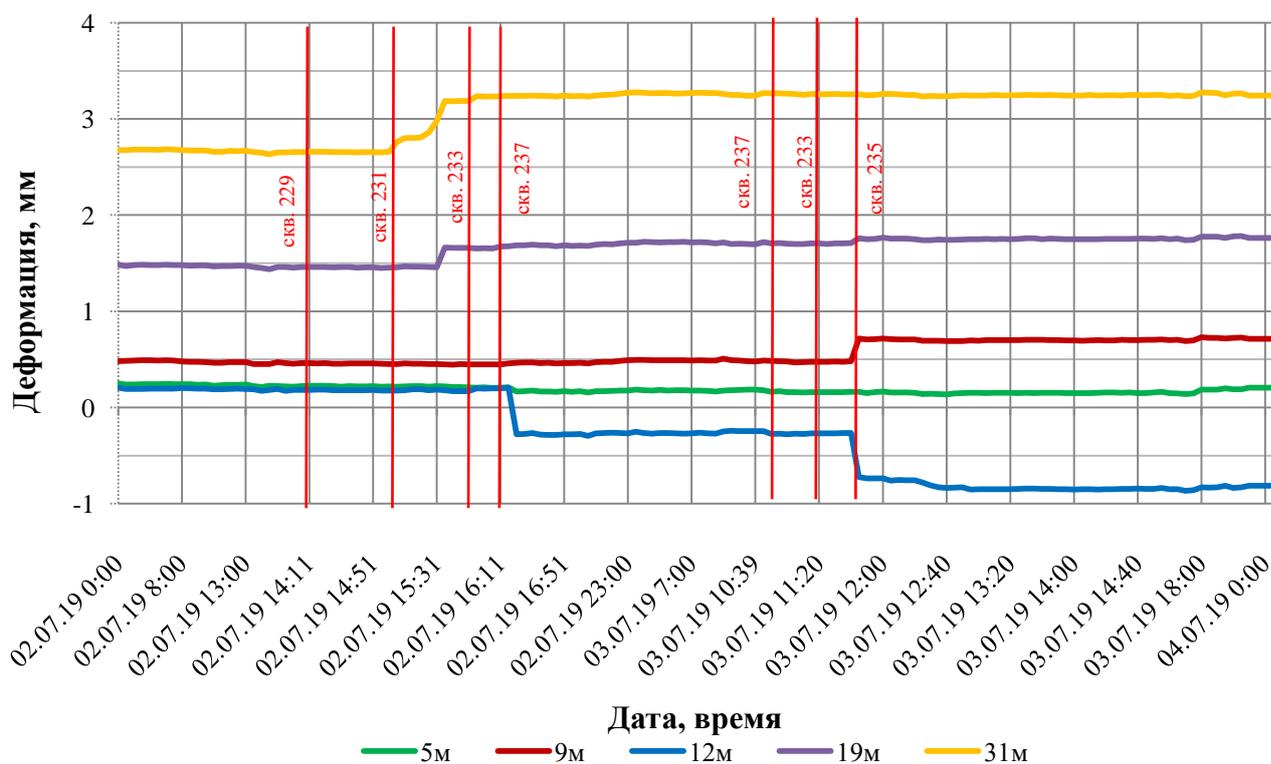


Рисунок 5 – График развития деформаций по экстензометрам скважины Э1–31А за период производства опытного нагнетания

В результате анализа графика можно сделать вывод об оказании незначительного влияния инъекционных работ на экстензометры. Максимальные деформации составили 1 мм.

С началом нагнетания в скважину №299 экстензометры деформации не фиксировали. С перестановкой пакера в скважину №231 наблюдалось увеличение деформаций на 1 мм по экстензометру на отм. 31м. Деформации в плюсовую зону означают, что при нагнетании раствора грунты уплотнились, и оголовок скважины совместно с грунтовыми реперами на других отметках сместился вниз. Нагнетание в скважину №233 заметного влияния на экстензометры не оказало. При нагнетании в скважину №237 и закачке остатков раствор в скважину №243 в горизонт на отм. 10 м наблюдались деформации по экстензометру на отм. 12 м.

При продолжении инъекционных работ на следующий день при закачке раствора в скважины №233 и №237 деформаций по экстензометрам не выявлено. Только при закачке раствора в скважину №235 наблюдались деформации на отм. 9 м и 12 м на величину 0,25-0,5 мм.

Относительно качества выполнения монтажа манжетных колонн на опытном участке можно сказать, что они выполнены с надлежащим качеством, выхода раствора между кондуктором и манжетной трубой не наблюдалось, следовательно, состав обойменного раствора был подобран верно. Все выходы раствора на поверхность происходили либо снаружи от кондуктора скважины, либо на расстоянии несколько метров от нагнетаемой скважины.

Следует отметить, что при закачке остатков раствора в скважину №243 в самый нижний горизонт на отм. 10 м раствор вышел на поверхность у экстензометрической скважины.

Таким образом, можно сделать вывод, что нагнетание на данном опытном участке прошло успешно, манжетных колонн, выполненных с нарушением, не выявлено. Для определения изменения физико-механических свойств закреплённого массива были проведены геофизические исследования. Также, количество раствора 100 л на 1 горизонт нагнетания следует признать минимально возможным, поскольку данный объём нагнетания оказал незначительное влияние на основание здания, так как показания экстензометров изменились в пределах 1 мм. При нагнетании на следующем опытном участке было предложено нагнетать в 2 раза больше раствора, т.е. по 200 л на 1 горизонт в каждой скважине с сохранением остальных параметров нагнетания, что и было реализовано на опытном участке д.36/1 в осях 22-24.

Комплекс геофизических работ показал, что в рамках этапа после закрепления грунтов у дома №31 лит. А и построенных 3D моделей распространения плотностных параметров, характеризующих грунты «до» и «после» мероприятий по закреплению можно сделать следующие выводы:

- 1) Наблюдается изменение плотности грунтов в сторону увеличения, как в пределах опытного участка, так и на отдалении до 6 метров в противоположенную от дома сторону;
- 2) Значительная часть цементного раствора при нагнетании ушла в сторону от участка, в котором непосредственно производились нагнетания;
- 3) В грунтах верхней части разреза (до 1,8 – 2,0 м) не выявлено значительных изменений.

Работы на опытном участке показали, что регламент нагнетания, в среднем по массиву, позволяет повысить прочностные характеристики грунтового массива, однако, отмечается неравномерное распределение инъекционного раствора, причем и по глубине и по горизонтали.

### Опытный участок по д.36/1, лит. А (в осях 22-24)

Нагнетание на опытном участке д.36/1, лит. А в осях 22-24 производилось 16.07.2019, 17.07.2019 и 18.07.2019 в 5 вертикальных скважин №№ 105, 107, 109, 111 и 113, расположенных вблизи экстензометрической скважины Э6-36 (рис. 6). В 10 горизонтов, расположенных в интервале отм. -5м – -2м нагнеталось по 200 л раствора в каждый горизонт во все 5 скважин Первоначальный состав раствора, аналогично опытному участку по д.31, лит. А включал в себя на 1 м<sup>3</sup>:

- цемента – 1200 кг;
- воды – 560 л;
- жидкого стекла – 9,6 кг;
- суперпластификатора С-3 – 2 кг.

Последовательность нагнетания была выбрана через одну скважину, начиная со скв. №105, далее скв. №109 и затем скважина №113. На следующий день, после выстойки раствора, предполагалось прокачать скважины №107 и №111. Последовательность нагнетания в каждой манжетной колонне была выбрана последовательно от нижнего горизонта к верхнему. Хронология нагнетания показана в табл. 2.

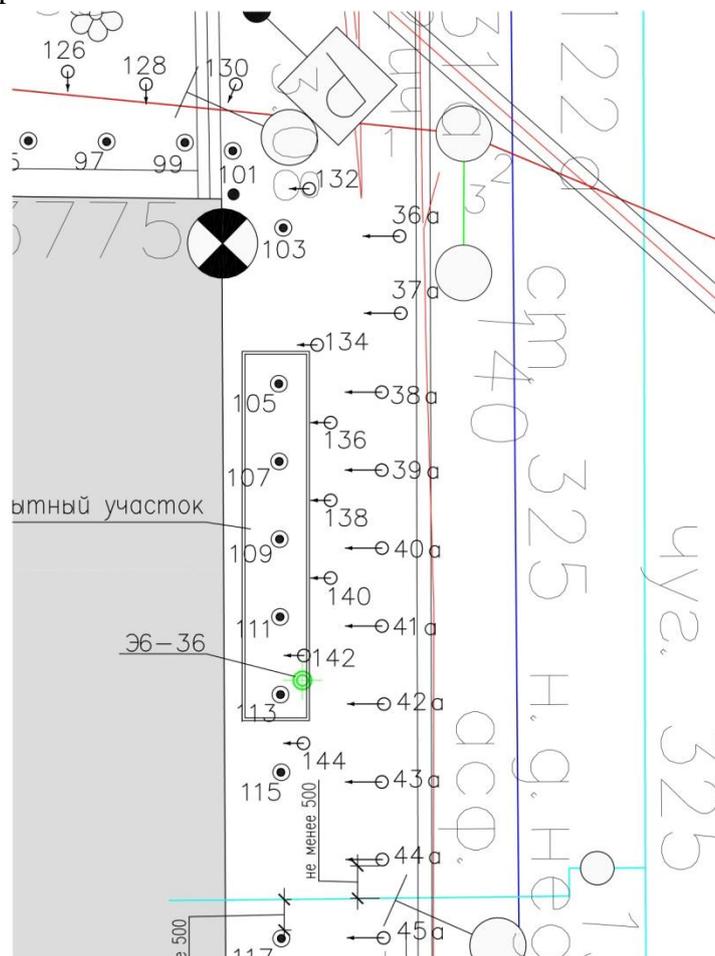


Рисунок 6 – План опытного участка по д.36/1, лит. А (оси 22-24)

Таблица 2 – Порядок и параметры инъекционных работ на опытном участке д.36/1, лит. А (оси 22-24).

Номер скважины	Начало нагнетания	Конец нагнетания	Количество раствора на горизонт, л	Состав раствора на 1 куб.м	Примечание
16.07.2019					
105	11.40	12.20	200	цемент - 1200 кг; вода - 560 л; жидкое стекло - 9,6 кг; суперпластификатор С-3 - 2 кг	При прокачке 7-го снизу горизонта выход раствора у кондуктора скважины №39а
107	-	-	-		
109	13.05	13.15	200		При прокачке 4-го снизу горизонта выход раствора у кондуктора скважины №40а
111	-	-	-		
113	12.23	12.53	200		При прокачке 6-го снизу горизонта выход раствора у кондуктора скважины №39а
Остаток раствора закачан в скважину №144 по 100 л в горизонты 21-26 (сверху)					
17.07.2019					
105	11.31	11.33	200	цемент - 1200 кг; вода - 560 л; жидкое стекло - 9,6 кг; суперпластификатор С-3 - 2 кг	Излив при прокачке 6-го снизу горизонта в 1м от скважины
107	12.04	12.57	200		Выход раствора при прокачке 3-го снизу горизонта вдоль кондуктора
109	11.37	12.00	200		Начало нагнетания 3-го снизу горизонта, конец - выход раствора при прокачке 7-го снизу горизонта
111	13.01	13.18	200		Выход раствора при прокачке 4-го снизу раствора
					Начало нагнетания с 6-го снизу горизонта, конец - излив при прокачке 9-го снизу горизонта
113	10.56	11.28	200		
18.08.2019					
105	11.12	11.13	200	цемент - 1200 кг; вода - 560 л; жидкое стекло - 9,6 кг; суперпластификатор С-3 - 2 кг	Начало нагнетания - в 6-й снизу горизонт, окончание - выход раствора при прокачке 6-го снизу горизонта
107	11.30	12.50	200		Начало нагнетания - в 3-й снизу горизонт, окончание - выход раствора возле кондуктора при прокачке 7-го снизу горизонта
109	10.25	11.10	200		Начало нагнетания - в 7-й снизу горизонт, окончание - невозможность прокачки раствора на 10-м снизу горизонте
111	12.00	12.15	200		Начало нагнетания - в 4-й снизу горизонт, окончание - выход раствора около кондуктора скв. №107
113	10.15	10.25	200		Начало нагнетания - в 8-й снизу горизонт, окончание - выход раствора при прокачке 9-го снизу горизонта
Остаток раствора закачан в скважину №144 и в скважину №105 в горизонт на отм. 5,3м (200л)					

На рис. 7 показан график развития деформаций по экстензомерам скважины Э6–36 за период производства опытного нагнетания в течение 3 суток.

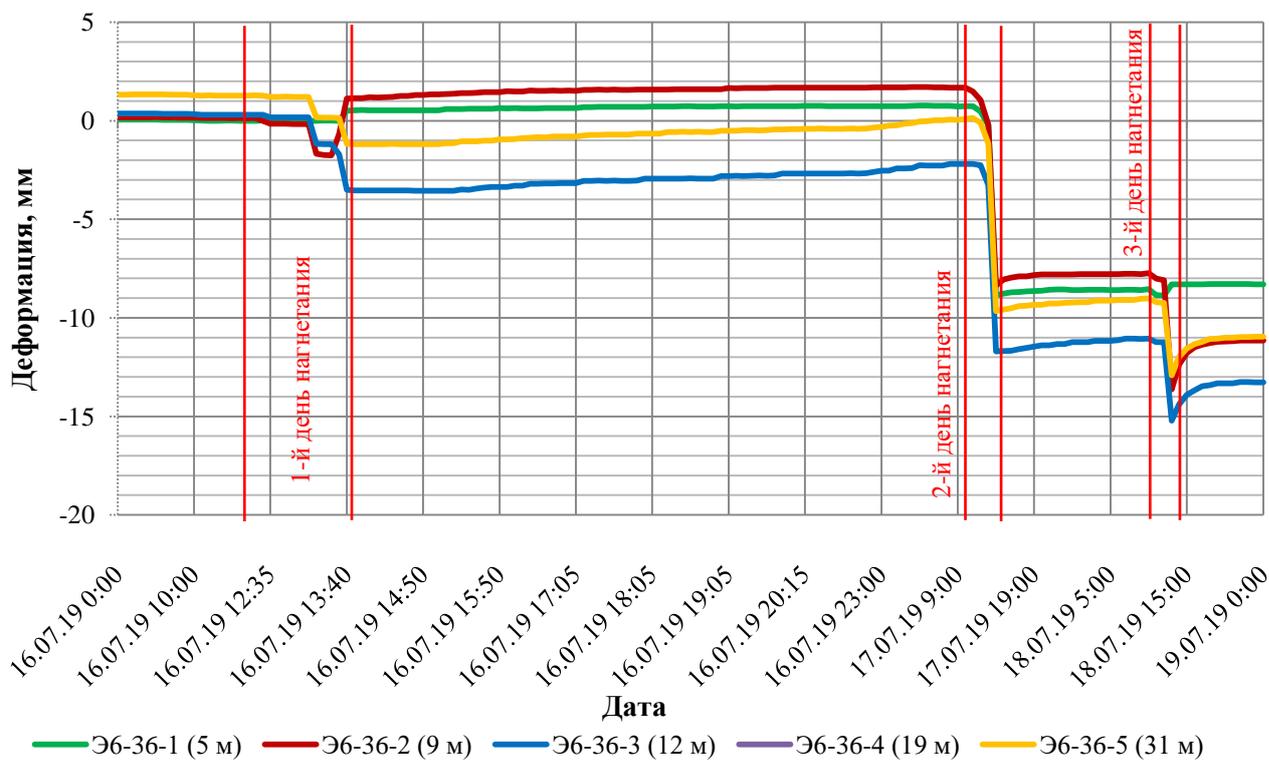


Рисунок 7 – График развития деформаций по экстензометрам скважины Эб–36 за период производства опытного нагнетания

В результате производства инъекционных работ на опытном участке следует отметить, что выбранные скважины соответствуют проекту и могут быть признаны работоспособными, так как инъекционный раствор выходил за пределами кондукторов инъецируемых скважин.

По результатам наблюдения по экстензометрической скважине можно сказать, что нагнетание раствора в течение 3-х дней работ вызвало суммарные смещения по каждому экстензометру порядка 15 мм.

В первый день было произведено инъецирование в 3 из 5 скважин. При этом смещение оголовка экстензометрической скважины составило в среднем 2-3 мм. При нагнетании раствора во 2-й день смещение оголовка составило около 10 мм. Это произошло вследствие затвердевания раствора в вышележащих слоях грунта, закачанного в 1-й день. При нагнетании в 3-й день произошло смещение оголовка ещё на 4-5 мм.

После 1-го дня нагнетания произошёл небольшой т.н. «отскок» показаний экстензометров на 1-2 мм, т.е. возврат значений к показаниям до нагнетания. Это можно объяснить разуплотнением массива грунта инъекционным раствором и образованием вертикальных поверхностей скольжений в результате выхода раствора на поверхность. После 2-го дня нагнетания «отскок» был зафиксирован так же в среднем на 1 мм при значительно большем деформировании массива при инъецировании. После 3-го дня нагнетания «отскок» составил 2 мм при увеличении деформаций на 4 мм в процессе инъецирования.

Данные «отскоки» являются негативным явлением, поскольку уменьшают эффект компенсационной инъекции. Для уменьшения величины «отскоков» необходимо либо сокращать время схватывания раствора за счёт добавок, что вызовет технологические сложности при работе с техникой (забивание подающих шлангов), либо уменьшать

количество раствора, подаваемого в горизонт в течение 1 закачки. Следовательно, количество раствора 200 л в 1 горизонт является избыточным. По результатам нагнетания данного опытного участка было рекомендовано выполнить нагнетание на следующем опытном участке с аналогичными параметрами, изменив количество раствора, подаваемого 1 горизонт за одну прокачку до 100 л, а затем после выстойки раствора в течение 2-3 суток, повторить нагнетание.

Работы на опытном участке показали, что регламент нагнетания, в среднем по массиву, позволяет повысить прочностные характеристики грунтового массива, но при этом отмечается неравномерное распределение инъекционного раствора, причем и по глубине и по горизонтали.

По состоянию на осень 2020г. работы находятся на стадии реализации. Выполнено превентивное нагнетание в основание всех контролируемых зданий. Параметры нагнетания были приняты согласно результатам работ на опытных участках за исключением количества раствора. Так, по результатам работ в интервале отметок от -2м до -5м в верхние 5 горизонтов закачивалось по 50 л раствора, а в нижние 5 – по 100 л. В скважины, пробуренные под углом 40°, нагнетание производилось в нижние 10 горизонтов объемом 100 л на 1 горизонт.

На станционном комплексе ведутся горнопроходческие работы в среднем станционном тоннеле и боковом станционном тоннеле 2-го пути, тягово-понижительной подстанции и пристанционных выработках.

По всем экстензометрическим скважинам ведётся непрерывный мониторинг деформаций грунтового массива. Также, по завершении цикла превентивного нагнетания были выполнены геофизические работы, показавшие удовлетворительный результат инъекционного укрепления основания зданий. В ходе горнопроходческих работ были зарегистрированы вертикальные деформации зданий и дана рекомендация на выполнение 2-го этапа инъекционных работ с целью компенсации деформаций.

## **Заключение**

Реализованная технология минимизации деформаций фундаментов зданий и исключения их неравномерной осадки, расположенных на подрабатываемых территориях, предполагает комплексный подход с усилением фундаментов, компенсационными мероприятиями и обязательным ведением геотехнического мониторинга для контроля смещений, возникающих как от строительства станционных комплексов, так и от мероприятий, направленных на уменьшение смещений дневной поверхности.

Комплекс геофизических работ в составе геотехнического мониторинга позволяет не только оценить качество выполняемых компенсационных работ, но и показать места разуплотнений, образуемых в массиве в процессе производства работ.

Разработанная и внедренная последовательность компенсационных мероприятий позволяет своевременно выполнять инъекционные работы в моменты развития деформационных процессов в грунтах оснований, не дожидаясь, пока они приведут к деформациям зданий. Многократное использование скважин с обязательной их промывкой после каждого этапа компенсационных работ позволяет управлять осадкой зданий в течение всего срока строительства станционного комплекса глубокого заложения.