

**К.П.БЕЗРОДНЫЙ**, д-р техн. наук, зам. генерального директора по науке, [besrodny@lenmetro.ru](mailto:besrodny@lenmetro.ru)  
**А.И.САЛАН**, зам. генерального директора, главный инженер, [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)  
**В.А.МАСЛАК**, канд. техн. наук, генеральный директор, [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)  
**В.А.МАРКОВ**, начальник отдела, [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)  
**М.О.ЛЕБЕДЕВ**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, [lebedev-lmgt@yandex.ru](mailto:lebedev-lmgt@yandex.ru)  
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»

**K.P.BEZRODNY**, Dr. in eng. sc., vice director, [besrodny@lenmetro.ru](mailto:besrodny@lenmetro.ru)  
**A.I.SALAN**, vice director, [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)  
**V.A.MASLAK**, PhD in eng. sc., director, [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)  
**V.A.MARKOV**, head of departament, [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)  
**M.O.LEBEDEV**, PhD in eng. sc., head of laboratory, [lebedev-lmgt@yandex.ru](mailto:lebedev-lmgt@yandex.ru)  
«Lenmetrogiprotrans» OJSC

## ПРАКТИКА ВНЕДРЕНИЯ БЕЗОСАДОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Повсеместно в Санкт-Петербурге верхние слои представлены четвертичными отложениями, уровень грунтовых вод находится примерно в 2,5 м от поверхности. Ниже четвертичных отложений на глубине 40-60 м находятся кембрийские (протерозойские) глины. На дневной поверхности много старинных зданий, имеющих историческую и архитектурную ценность, которые не терпят осадок дневной поверхности. Строительство станций и эскалаторных наклонных тоннелей вызывает осадки поверхности. В Петербурге разработаны технологии сооружения эскалаторных тоннелей и станционных тоннелей, минимизирующих осадки дневной поверхности.

*Ключевые слова:* тоннели, смещение, напряжения, протерозойские глины.

## SETTLEMENT-FREE TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION OF THE SAINT PETERSBURG SUBWAY

Everywhere in Saint Petersburg the top strata are represented by quaternary deposits, and the ground water level is approximately 2,5 m down from the surface. Below the quaternary deposits, at depths of 40 to 60 m, are Cambrian (Proterozoic) clays. There are many ancient buildings of a historic and architectural value on the day surface that cannot tolerate day surface settlements. The construction of underground stations, and especially inclined escalator tunnels, causes surface settlements. Technologies of construction of escalator tunnels and station tunnels have been developed in Saint Petersburg to minimize such day surface settlements.

*Key words:* tunnel's, displacements, stresses, proterozoic clay's.

Весьма сложные условия строительства объектов Санкт-Петербургского метрополитена в центральной части города заставляют искать и внедрять новые технологии для обеспечения сохранности зданий и сооружений на дневной поверхности.

Ранее были разработаны технологии и конструкции, снижающие осадки дневной поверхности:

- обжатые в породе сборные обделки станций и перегонных тоннелей;

- опережающая забой монолитная бетонная арочная крепь в предварительно созданной прорези.

Опыт строительства свидетельствует, что наибольшее влияние на величину осадок дневной поверхности оказывало строительство эскалаторных тоннелей, пересекающих на большей протяженности водонасыщенные и совершенно неустойчивые грунты.

Традиционно применяемая технология контурного рассольного замораживания грун-

тов обеспечивает необходимые условия для проходки тоннелей протяженностью более 100 м. Процесс замораживания вызывает деструктуризацию грунта, что приводит к значительным осадкам при последующем оттаивании.

Разработана двухстадийная технология создания контурного ограждения эскалаторного тоннеля: закрепление грунтов методом струйной цементации через вертикальные скважины с дневной поверхности до границы кембрийских глин. При наличии препятствий на поверхности (инженерные сети, капитальные строения и т.п.) возможно использование наклонных скважин под углом до 60°, на второй стадии осуществляется рассольное замораживание закрепленного грунтоцементного массива с целью создания противодиффузионного ограждения.

Для формирования контурного грунтоцементного ограждения эскалаторного тоннеля станции «Звенигородская» диаметром

10,5 м и длиной около 100 м было задействовано около 1800 вертикальных скважин. Вначале каждую пробуривали на проектную глубину диаметром 151 мм установкой «jet Grouting», затем в процессе обратного хода на проектных отметках производили гидравлическое смешение грунта и раствора на цементной основе. Данная технология обеспечивает создание грунтоцементной сваи диаметром 800-1000 мм.

На рис.1 представлена схема грунтоцементного ограждения эскалаторного тоннеля толщиной 1 м.

Рассольное замораживание является второй стадией комбинированной технологии и осуществлялось после полного отвердевания и стабилизации температуры грунтоцементного ограждения тоннеля. Наклонные замораживающие скважины диаметром 114 мм в количестве 40 шт. бурили с дневной поверхности после завершения работ по струйному закреплению таким образом,

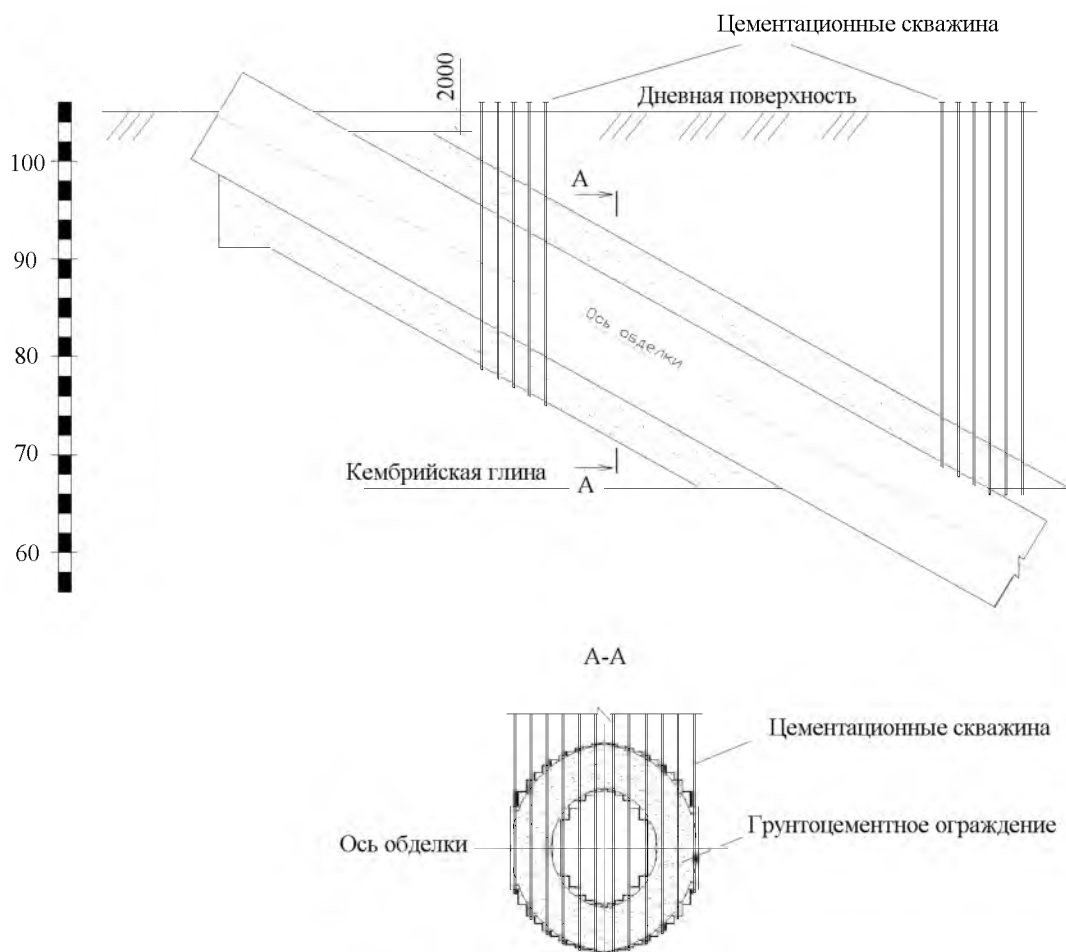


Рис.1. Струйная цементация массива

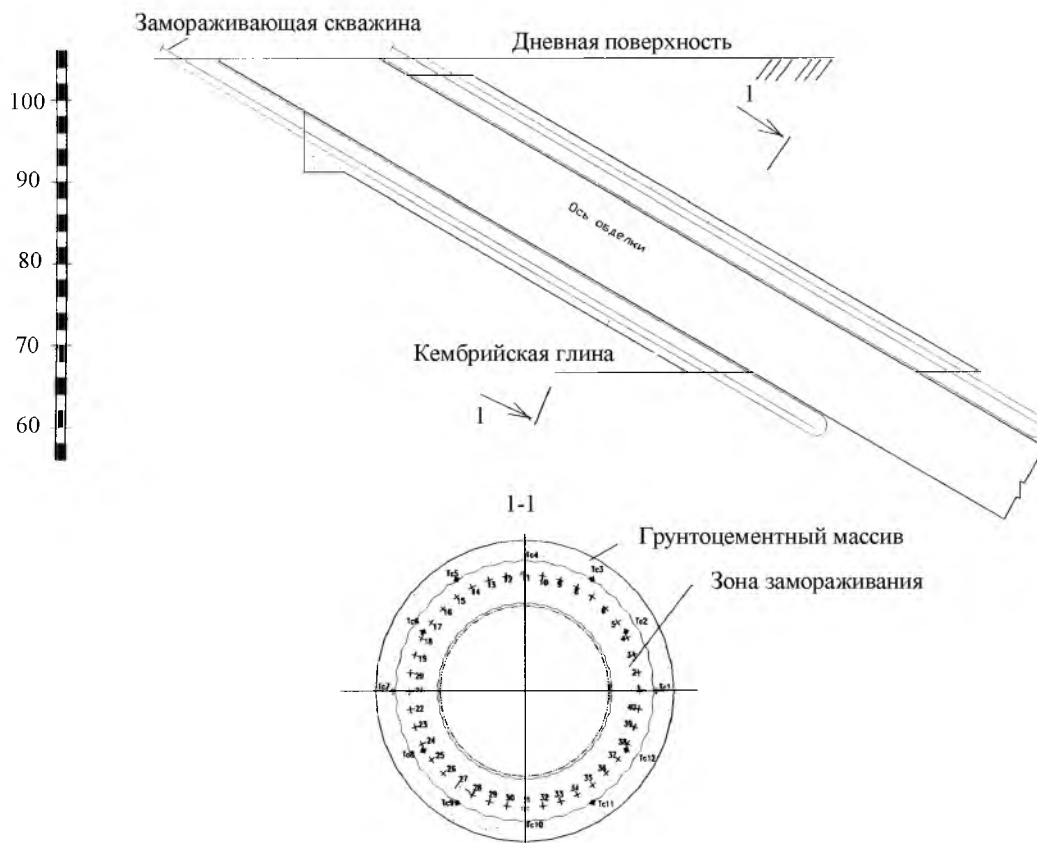


Рис. 2. Комбинированное закрепление грунтов ограждения эскалаторного тоннеля

чтобы после грунтоцементного массива зайти в слой твердых глин на глубину не менее 3 м. Схема рассольного замораживания эскалаторного тоннеля приведена на рис.2.

Были разработаны конструкции крепи и обделки, а также технологии их сооружения и проходки, практически исключая применение ручного труда. Арочно-бетонная крепь предусмотрена с межрамным заполнением набрызг-бетоном, либо бетоном. По внутреннему контуру крепи выполняется гидроизоляция, затем сооружается монолитная железобетонная обделка.

Эти конструкции и технологии были воплощены при строительстве наклонного хода станции «Звенигородская». Во время проходки наклонного хода вели геотехнический мониторинг, который включал оценку качества стабилизации грунтов; устойчивости призабойной части тоннеля; осадок дневной поверхности, а также определение напряженно-деформированного состояния крепи и обделки тоннеля; конвергенции внутреннего контура выработки; фактических деформационно-прочностных свойств вмещающих грунтов.

Оценку устойчивости призабойной части тоннеля осуществляли с помощью регистрации естественных импульсов электромагнитного поля Земли.

Напряженно-деформированное состояние крепи и обделки определяли по размещенным в них струнным датчикам и последующей обработки показаний по специальным методикам.

Конвергенцию контура выработки устанавливали лазерными дальномерами.

Фактические деформационно-прочностные свойства вмещающих грунтов вычисляли, зная скорости продольных и поперечных волн, полученных при сейсмопрофилировании. Осадку дневной поверхности и цоколей зданий измеряли по реперам геодезическими приборами.

В результате натурных исследований напряженно-деформированного состояния системы «массив – крепь – обделка» получены зависимости величины нормальных тангенциальных напряжений в аркобетонной крепи от глубины заложения наклонного хода (рис.3).

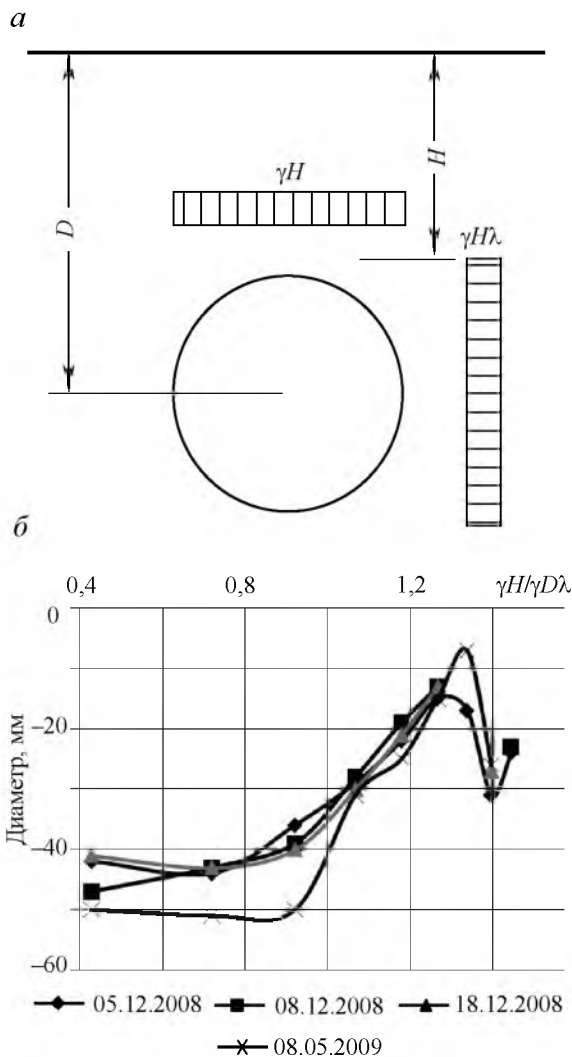


Рис.3. Конвергенция на горизонтальном диаметре тоннеля:  
*a* – расчетная схема; *б* – зависимость конвергенции на горизонтальном диаметре от глубины заложения наклонного хода

Напряжения в обделке на сегодняшний день малы. На начальном этапе в период гидратации цемента была экзотермическая реакция, и нормальные тангенциальные напряжения несколько повышались.

Конвергенция на горизонтальном диаметре зависит от глубины заложения наклонного хода.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Создана комбинированная технология стабилизации водонасыщенных совершенно неустойчивых грунтов, позволяющая минимизировать осадки дневной поверхности (без усиления и расселения зданий и сооружений).

2. Разработанная технология практически исключает применение ручного труда при сооружении наклонного хода.

3. Результаты проведенного геотехнического мониторинга показали значительный запас несущей способности крепи и обделки.

Фирмой «Herenknext» по заданию «Ленметрогипротранса» и «Метростроя» создан тоннелепроходческий механизированный комплекс с пригрузом забоя для сооружения наклонных эскалаторных тоннелей, при котором практически отсутствуют смещения контура тоннеля, поскольку давление пригруза равно «снимаемым» напряжениям при проходке.

Первый опыт сооружения эскалаторного тоннеля в четвертичных водонасыщенных совершенно неустойчивых грунтах с помощью ТПМК «Herenknext» на станции «Обводный канал» показал значительное снижение осадок дневной поверхности.

Как известно, до 40 % смещений контура подземной выработки происходит впереди забоя, поэтому новые разработки были направлены на стабилизацию грунтового массива на этом участке. Это достигалось бурением скважин и установкой в них экрана из труб с инъекцией над сводом будущей выработки, бурением скважин в теле будущего тоннеля и устройством в них инъекционных фиберглассовых анкеров. Экран из труб максимально опережал забой на 7 м, минимально на 3 м, фиберглассовые анкера соответственно 14 и 6 м.

Был разработан проект конструкций, организации строительства (рис.4) и геотехнического мониторинга.

Геотехнический мониторинг решил следующие задачи:

- определение напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов крепи и окружающего грунтового массива в натуральных условиях;
- оценка устойчивости массива в призабойной зоне;
- определение деформации дневной поверхности.

Технологический цикл работ по сооружению заходок верхнего уступа руддвора и вентиляционного тоннеля включал в себя:

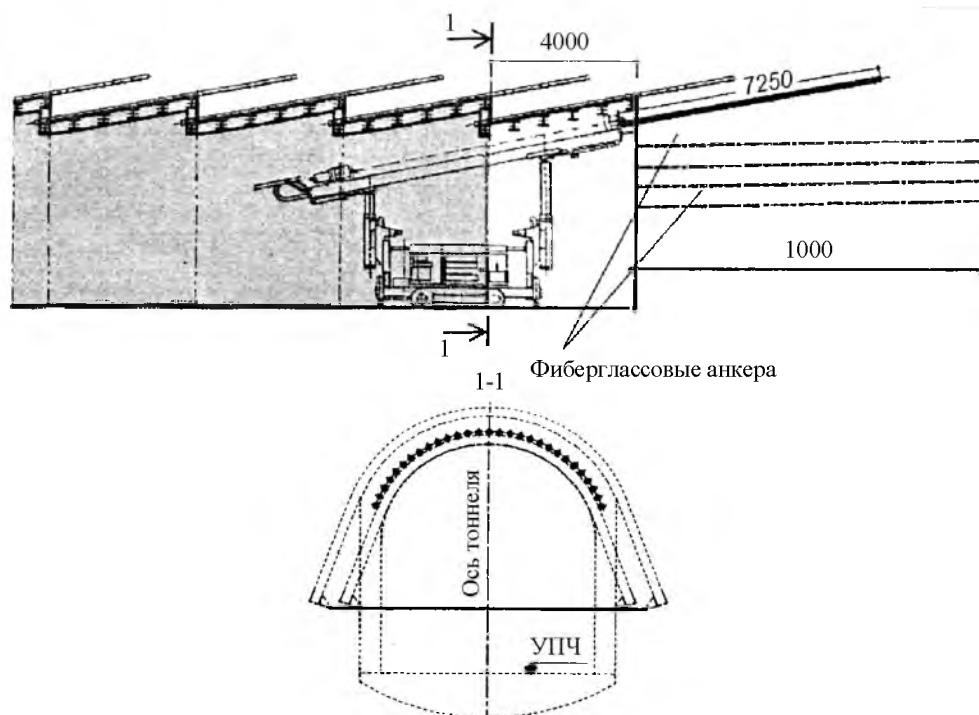


Рис.4. Устройство экрана из труб

- устройство буровой установкой SM-475-T скважин диаметром 124 мм и длиной 14 м и установка в них опережающих забой фиброглассовых инъекционных анкеров;

- сооружение опережающих забой экранов из труб диаметром 102 мм и длиной 7 м в предварительно пробуренных скважинах диаметром 121 мм с последующим заполнением их инъекционным раствором;

- разработка породы забоя на одну заходку длиной 80 см агрегатом BROKK 180; установка рам крепи из двутавра № 30 агрегатом BROKK 180; затем межрамное пространство заполняется набрызг-бетоном, либо бетонируется.

На арках устанавливали струнные датчики и динамометрические фрагменты двутавров, оснащенные тензорезисторами.

Напряжения в трубах опережающего экрана рассчитывали по измеренным местным деформациям с помощью мерных баз.

По смещениям специальных марок, закрепленных в пробуренных впереди забоя горизонтальных скважинах, получали горизонтальные деформации массива по мере проходки тоннеля.

Для определения усилий в инъекционных анкерах в них устанавливали струнные датчики. Исходя из этого, вычисляли верти-

кальные и горизонтальные напряжения в массиве, смещения контура выработки получали с помощью тахеометрической съемки марок, установленных на арках.

Устойчивость системы «массив – крепь» в призабойной части оценивали путем регистрации естественных импульсов электромагнитного поля Земли (ЭИЭМПЗ).

Деформации дневной поверхности фиксировали по реперам геодезическими методами.

По результатам геотехнического мониторинга можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствие смещений на дневной поверхности дает основание говорить о реализации безосадочной технологии строительства.

2. Радиальные напряжения на контакте крепи и массива составляют 20 % от  $\gamma H$ .

3. Напряжения в анкерах достигают 190 МПа, горизонтальные смещения впереди забоя в массиве – до 11 мм и начинаются до подхода забоя на расстоянии 6 м.

4. Система «массив – крепь» в призабойной зоне находилась в устойчивом состоянии.

5. В расчетах необходимо учитывать ползучесть протерозойских глин.

Даны рекомендации по совершенствованию крепи и применению элементов рассмотренной технологии при строительстве станционных тоннелей.

При строительстве станции «Адмиралтейская» в центральной исторической части города, где расположены дома постройки XVIII и начала XIX вв., являющиеся памятниками архитектуры местного и федерального значения, стояла сложная задача сохранения исторического облика. Эта задача была решена путем внедрения комплексных мероприятий с применением специальных способов работ на дневной поверхности и при ведении горно-проходческих работ.

На дневной поверхности был применен способ компенсационного инъецирования в грунты твердеющих составов. Работы разбиваются на два этапа. На первом – до проходки подземных выработок – осуществляется усиление фундаментов и основания под ними, на втором – компенсация разуплотнения грунта по мере проходки подземной выработки.

Здания, попадающие в зону влияния строительства, имеют бутовый фундамент на лежнях. Со временем раствор фундамента потерял свои связующие качества, а лежни во многих местах сгнили. Поэтому производилось инъецирование усиление тела фундаментов с использованием кондуктора-инъектора.

Укрепление подстилающего фундамента слоя грунтов (1-2 м) осуществлялось инъецией твердеющих растворов в скважины, пробуренные через те же кондукторы.

На этом же этапе устанавливались глубинные грунтовые реперы и марки на зданиях, по которым в процессе проходки подземных выработок проводились постоянные измерения их положения.

Следующий этап – установка, омоноличивание манжетных колонн обойменным раствором и ведение компенсационной инъекции в зоны вероятного разуплотнения грунта по мере проходки подземных выработок с помощью двойного тампона (обтюратора).

Манжетные колонны устанавливаются в скважины, пробуренные через те же кондукторы. Инъеция осуществляется в массив, расположенный ниже укрепленного ранее подстилающего фундамента слоя грунта. Причем место инъеции в плане и по глубине, количество закачиваемого раствора определяются, исходя из данных наблюдений за реперами.

Таким образом, предотвращение осадок дневной поверхности достигается нагнетани-

ем твердеющих растворов в массив, расположенный между подземным сооружением и фундаментом зданий, для компенсации осадок. Цель этих работ – не допустить развития осадок, которые могут привести к деформациям зданий.

Чрезвычайно важным здесь является принятие квалифицированного решения на основании результатов измерений по грунтовым реперам и маркам о месте, количестве режимах ведения инъекционных работ. Поэтому неотъемлемой частью всего технологического процесса является мониторинг, основанный на постоянном контроле всех параметров инъецирования и измерений смещений с обратной связью.

Из сказанного вытекают следующие задачи, которые подразделяются на общие (предварительные) и касающиеся непосредственно мониторинга.

Общие (предварительные) задачи:

- Расчет осадок поверхности по мере проходки подземной выработки.
- Обследование зданий, попадающих в зоны влияния осадок.
- Расчет деформаций зданий при ожидаемых осадках в процессе проходки, определение величин допустимых осадок и установление критериев компенсационной инъекции.
- Определение мест и порядка выполнения компенсационной инъекции.
- Установка реперов и марок наблюдений за деформациями грунтового массива, зданий и сооружений.

Задачи мониторинга:

- Непрерывные замеры перемещений защищаемых строений и грунта.
- Оперативная обработка данных.
- Контроль за технологическими параметрами инъецирования.
- Оперативная связь между операторами мониторинга и управлением технологическими процессами.
- Квалифицированная интерпретация данных измерений.
- Разработка технологических карт ведения инъекционных работ.

Такие работы были проведены в Санкт-Петербурге при строительстве станции «Адмиралтейская» под домами № 5, 7, 9 по Малой Морской улице.