

УДК 550.8.05

## МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ЦЕМЕНТНЫМИ РАСТВОРАМИ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

АНДРИАНОВ С.В.<sup>1</sup>, ЛИХАНОВ Д.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** Инъекционное закрепление грунтов широко применяется при строительстве промышленных и гражданских зданий, в подземном и дорожном строительстве. Данная методика используется при усилении грунтового основания сооружений, защиты фундаментов от агрессивного воздействия, ликвидации водопритоков (течей) в горных выработках, удаления связной воды в грунтах, увеличения коэффициента уплотнения грунта.

Качество инъекционного закрепления грунтового массива проверяется бурением скважин и проходкой шурфов с отбором монолитов для лабораторных испытаний, статическим и динамическим зондированием, геофизическими методами [1]. Ниже приводятся примеры работ методом георадиолокации по контролю за качеством закрепления грунтов, оценке сплошности грунтоцементного массива. Рассматриваются возможности и перспективы методики, используя не стандартные варианты обработки георадиолокационных данных.

**Ключевые слова:** Георадар, Георадиолокация, Атрибутный анализ, Поле обратного рассеяния, Инъекционное закрепление грунтов, Мониторинг

## SOIL CONSOLIDATION PROCESS MONITORING USING GPR METHOD

ANDRIANOV S.V.<sup>1</sup>, LIKHANOV D.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JSC «Scientific Research, Design and Survey Institute «Lenmetrogioprotrans»,  
Saint Petersburg

**Abstract.** Injection soil consolidation is widely used in the construction of industrial and civil buildings, in underground and road construction. This technique is used to strengthen the soil base of structures, protect foundations from aggressive effects, eliminate water inflows (leaks) in mines, remove cohesive water in soils, and increase the coefficient of soil compaction.

The quality of the injection consolidation of the soil massif is checked by drilling wells and driving pits with the selection of monoliths for laboratory tests, static and dynamic sensings, geophysical methods [1]. Below are examples of work using the GPR method to control the quality of soil consolidation, assess the continuity of the soil-cement massif. The possibilities

and prospects of the technique are considered, using non-standard options for processing GPR data.

**Keywords:** ground penetrating radar, gpr, attribute analysis, backscattering field, injection soil stabilization, monitoring.

При проходке тоннелей и станционных комплексов глубокого заложения в ходе строительства возникают значительные деформации вышележащей толщи грунта и расположенных на ней зданий и сооружений. В особенности остро эта проблема стоит при строительстве объектов метрополитена в историческом центре города. Для минимизации данного фактора выполняется компенсационное нагнетание цементного раствора в грунты основания здания [2].

В данной статье приведен пример работ по оценке качества закрепления грунтов методом георадиолокации после выполнения мероприятий по компенсационному нагнетанию цементного раствора в скважины, расположенные по периметру здания, находящегося в зоне влияния строительства станционного комплекса в г. Санкт-Петербурге (ст. метро «Театральная»).

#### **Методика работ**

Нагнетание цементных растворов в грунтовый массив непосредственно под здание и по периметру посредством устройства манжетных колонн (глубиной 10 м) позволяет производить консолидацию массива с образованием «квазиплиты» в основании здания с улучшенными по сравнению с окружающим грунтом характеристиками, а так же в дальнейшем компенсировать осадки. Нагнетание ведется в указанные горизонты манжетной колонны через двусторонний пакер с вычисленными для конкретной ситуации технологическими параметрами (плотность, подвижность смеси, давление нагнетания, объем). Оперативный контроль над работами по нагнетанию ведется посредством геотехнического мониторинга, включающего в себя геодезические измерения по стеновым маркам и измерение послойных деформаций грунта посредством глубинных экстензометров. На рассматриваемом участке за время строительства станционного комплекса было произведено 3 цикла нагнетания. В первом цикле нагнетание выполнялось в верхние горизонты манжетной колонны (от -2м до -5м). Объем раствора в рассматриваемой зоне составил  $90\text{м}^3$ . На втором и третьем этапах использовались нижние горизонты манжетных колонн и объемы раствора составили  $7.5\text{м}^3$  и  $10.5\text{м}^3$ . После каждого цикла нагнетания выполняется обследование грунтов георадиолокационным и другими геофизическими методами для выявления ослабленных зон и подтверждения качества выполненных работ. Выявленные в результате геофизического обследования зоны разуплотнения учитываются в последующих циклах компенсационных нагнетаний. В данной статье приведены результаты мониторинга за состоянием грунтового массива георадиолокационным методом. В настоящее время мониторинг за закрепление не закончен и ведется в рамках текущего цикла наблюдений.

Результаты и методика работ мониторинга за сплошностью грунто-цементного массива методом георадиолокации приведены в рамках одной линии профиля, пересекающей место проведения мероприятий по нагнетанию цем. раствора и участок,

где нагнетание не производилось. Участок работ оснащен экстензометрической скважиной, диаметром 151 мм и глубина установки экстензометров -5,0; -9,0; -12,0; -19,0 и -31,0м.

Работы производились в несколько этапов. Первый этап был выполнен в ноябре 2017 г. до работ по нагнетанию раствора, манжетные колонны и экстензометрические скважины были смонтированы. Второй этап был организован в октябре 2019 г. через три недели после 1 цикла компенсационного нагнетания (инъектирование проводилось в каждую третью скважину). Третий этап проведен после следующего цикла нагнетания в апреле 2021 г. Четвертый – в июле 2021 г. Положение линии рассматриваемого профиля при всех циклах наблюдений оставалось неизменным.

Георадиолокационные работы проводились георадаром ОКО-3 производства ГК «Логис-Геотех». При георадиолокационном профилировании использовался шаг 100 мм, волновые изображения разрезов в настоящей статье приведены до времени записи (развертки) 120 нс. Зондирование осуществлялось в непрерывном варианте в режиме «По перемещению» с привязкой георадиолокационных трасс к пройденному расстоянию штатным одометром. Для минимизации помех и повышения соотношения «сигнал-шум» было установлено аппаратное восьмикратное накопление результатов измерений в каждой точке с последующим осреднением. Основой для георадиолокационных разрезов являлось сканирование антенным блоком АБ-250М с центральной частотой зондируемых импульсов 250 МГц. Измерения на всех циклах наблюдений были выполнены одним антенным блоком с аналогичными настройками записи сигналов.

Геологический разрез на всю глубину зондирования представлен техногенными насыпными грунтами (песок, строительный мусор и пр.) и четвертичными песками. При усредненном показателе диэлектрической проницаемости грунтов  $\epsilon=10$  удалось получить устойчивый сигнал, отраженный от глубин до 6-7 м.

На рис. 1 показана панорамная фотография участка работ с отображением линии георадиолокационного профиля и положения экстензометрической скважины. Участок представлен стыком между двумя домами: слева от которого под дом, расположенный левее, нагнетание не производилось (не предусматривалось проектом), справа от сочленения домов с расстоянием между скважинами около 1 м выполнялись мероприятия по инъекционному нагнетанию цем. раствора. Глубина инъекционных скважин составляет 10 м.

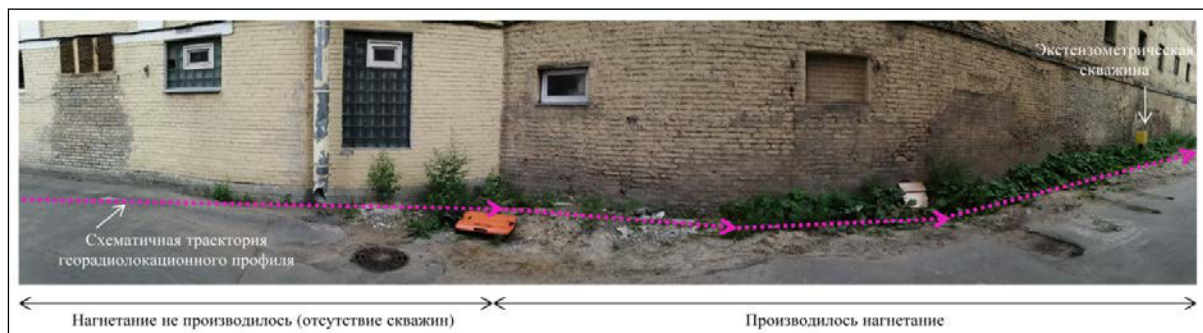


Рис.1. – Панорамная фотография участка работ с отображением линии георадиолокационного профиля, обозначением положения экстензометрической скважины

В связи с достаточно неоднозначной интерпретацией георадиолокационных данных в волновом представлении, в особенности для оценки качества закрепления грунтового массива в рамках мониторинга, был выполнен атрибутивный анализ радарограмм в программном продукте «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ». В ходе автоматизированного анализа измерялись кинематические и динамические характеристики сигналов, формирующих поля обратного рассеяния, в результате чего имелся набор точек с координатами положения в пространстве георадиолокационного профиля. Каждая точка обладала набором атрибутов волнового поля, интерполяцией данных между которыми и формировался разрез требуемого атрибута. В результате обработки наиболее информативными оказались разрезы добротности поля обратного рассеяния – так называемый Q-фактор[3].

Георадиолокационные исследования по контролю качества закрепления грунтов заобделочного пространства горной выработки показали, что повышение значений добротности поля обратного рассеяния свидетельствует о пониженной плотности подстилающего грунта [4,5,6]. Таким образом, использование данного инструмента позволяет получить информацию о местоположении деструктивных зон и нарушенных участков и проследить динамику процессов по закреплению грунтов в рамках мониторинга.

### **Результаты**

На рис. 2 представлены результаты георадиолокационного профилирования по каждому циклу наблюдений с нанесением значений атрибута Q-фактор, где по оси абсцисс – длина профиля (м), по оси ординат – шкала глубины полученного изображения разреза (м). Максимальные значения атрибута Q-фактор, обозначенные красной цветовой гаммой, свидетельствуют о понижении относительной плотности грунтового массива и, наоборот, низкие значения атрибута (синий цвет) свидетельствуют об относительной плотности грунтов.

На рис. 2 также продемонстрировано как в период с октября 2017 г. до июля 2021 г. изменялись плотностные характеристики разреза. На изображении разреза, выполненного по профилю в октябре 2019 г., через 3 недели после первого цикла нагнетаний, наблюдается ухудшение плотностных характеристик грунтов на нижних горизонтах разреза (5-6 м). Вероятнее всего, это связано с единовременным нагнетанием больших объемов раствора, что привело к образованию множества локальных «гидроразрывов», при твердении которых произошла усадка растворного камня, приведшая к разуплотнению грунта между ними, о чем свидетельствует «отскок» на графике деформации по экстензометрам. Описанное явление соответствует развитию релаксационных процессов после завершения активной фазы нагнетания [7]. В дальнейшем, после следующих циклов нагнетания раствора происходило постепенное уплотнение образовавшихся ослабленных участков, что визуальным образом отображается на георадиолокационных изображениях разреза.

После каждого этапа наблюдений информация о наличии разуплотненных зон (на рисунке – красной цветовой гаммой) своевременно передавалась и учитывалась при дальнейших этапах нагнетания. На рисунке видно, как в интервале между пикетами профиля от 10 м до конца разреза происходит постепенная ликвидация ослабленных

участков в зоне выполнения компенсационного нагнетания цем. раствора в период с октября 2017 до настоящего времени (июль 2021 г.).

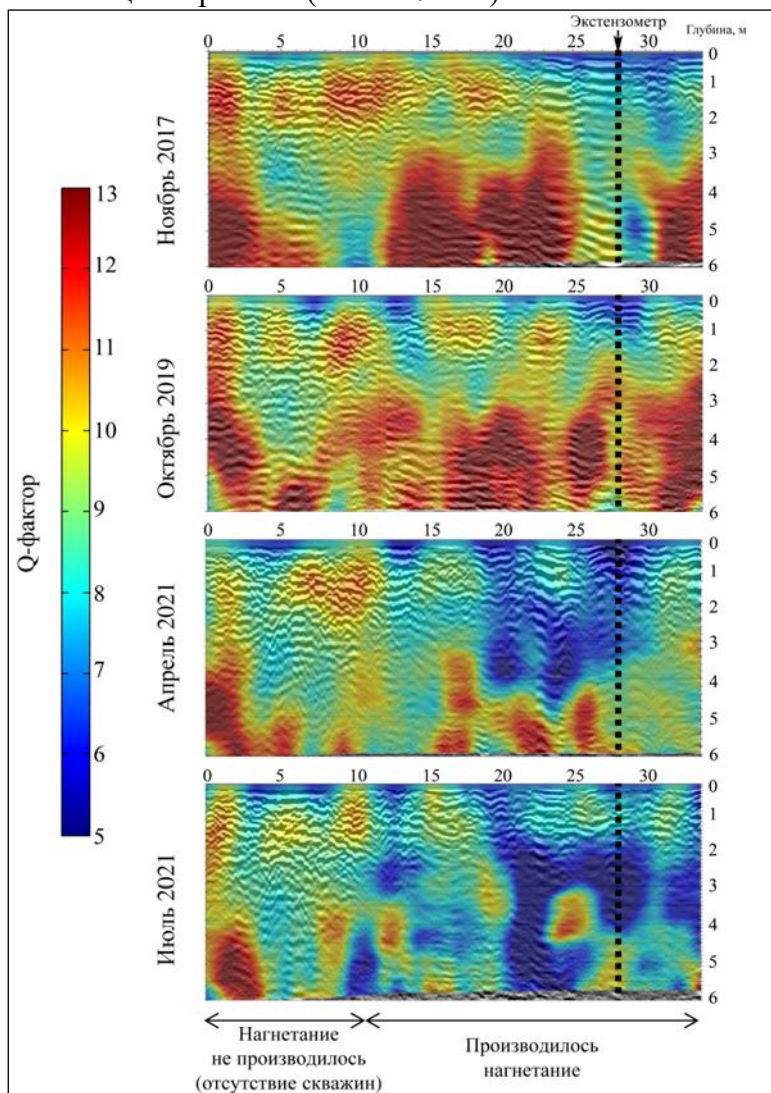


Рис.2. – Георадиолокационное изображение разреза, выполненного в рамках 4 циклов наблюдений, с нанесением результата анализа добротности поля обратного рассеяния (Q-фактор)

В другой части разреза, где нагнетание цем. раствора не предусматривалось (в интервале от начала профиля до 10 м), на всех этапах исследований наблюдается практически одинаковая картина. Исключение составляет горизонт на глубине 5-6 м в интервале между пикетами профиля 4 – 10 м, на котором плотность грунтов несколько повысилась, что связано с распространением раствора из ближайшей скважины. На всех приведенных разрезах была выбрана одна усредненная скорость распространения электромагнитной волны для оценки общего состояния грунта и определению нарушенных участков в горизонтальной плоскости. В целом, опыт наблюдений

показывает незначительное повышение скорости распространения сигнала после мероприятий по инъектированию цементного раствора.

На рис. 3 отображены графики осадок здания по данным геодезического мониторинга в рамках обследуемого участка и деформаций грунтового массива

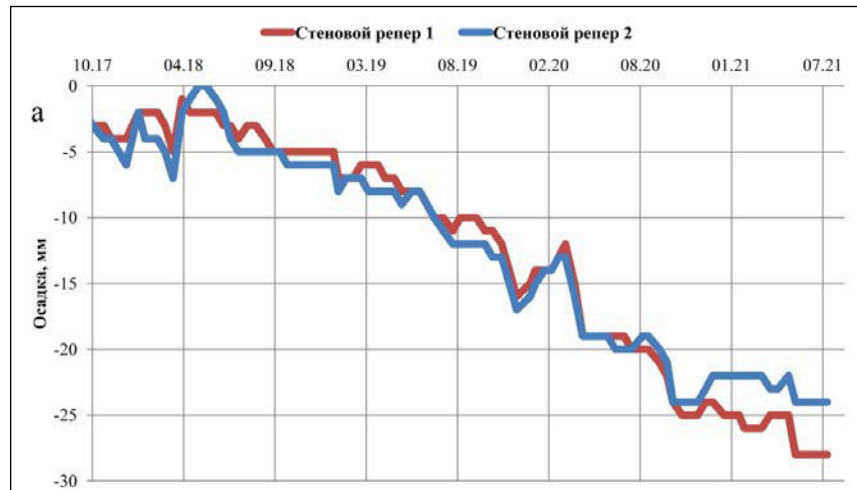


Рис.3. – Графики деформаций здания в непосредственной близости от участка работ по данным экстензометрического мониторинга (рис. 4) по датчикам в скважине находящейся непосредственно на линии георадиолокационного профиля. На представленных графиках хорошо прослеживаются периоды компенсационного нагнетания и периоды развития мульды оседания между ними (нагнетания в мае 2018 г., в мае 2020 г., марте 2021 г.).

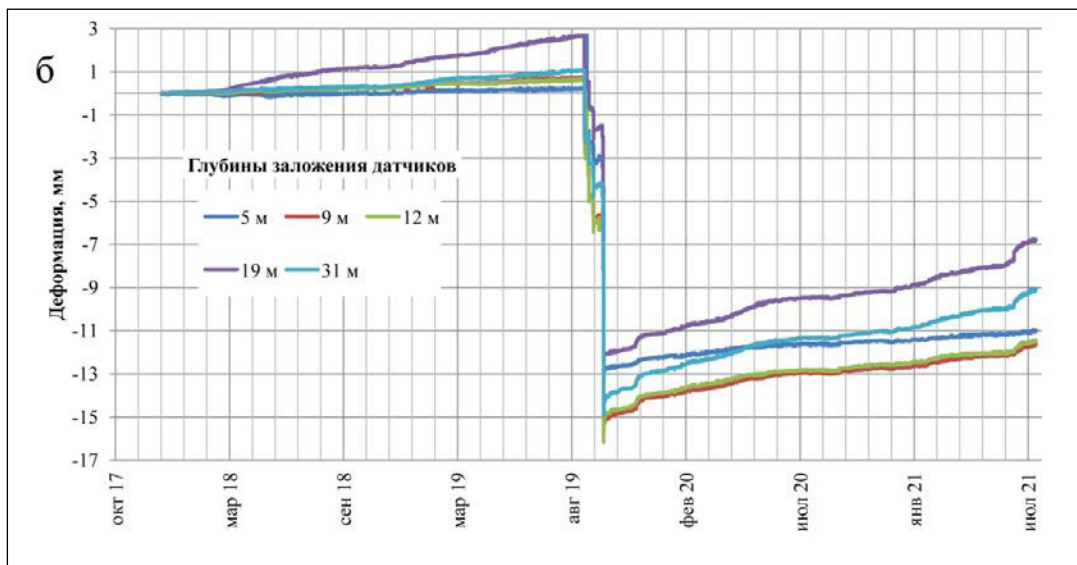


Рис.4. – Графики деформаций грунтового массива по данным экстензометров

## **Выводы**

Результаты измерений показывают, что применение георадиолокации по предлагаемой методике дает возможность:

- разработать критерии для оценки качества закрепления грунтов, контролировать сплошность закрепления на строительных объектах, своевременно устранять разуплотненные зоны компенсационным нагнетанием цем. растворами;

- оценивать контур закрепленного массива, его пространственное распределение, местоположение ослабленных зон, выполнять объемные измерения при наблюдениях по сети профилей;

- установить корреляцию между физико-механическими свойствами грунтов и добротностью поля обратного рассеивания для различных типов горных пород.

При отсутствии подвальной части невозможно провести наблюдения за изменениями грунтового массива непосредственно под зданием, в связи с этим данные комплексируются межскважинным сейсмоакустическим просвечиванием. К недостаткам данной методики можно также отнести все ограничения для георадиолокационных измерений: слабая помехоустойчивость, малая глубинность исследований в низкоомных геологических средах, уменьшение разрешающей способности при использовании более низкочастотных антенных блоков.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. СП 45.13330.2017 (СНиП 3.02.01-87) Земляные сооружения, основания и фундаменты.

2. Маслак В.А., Безродный К.П., Лебедев М.О. и др. Малоосадочные технологии при строительстве метро в историческом центре Санкт-Петербурга // Метро и тоннели. 2012. № 6. С. 26-29.

3. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка данных в автоматическом режиме // Геофизика. 2010. № 4. С. 76-80 .

4. Андрианов С.В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 5. С. 124-132 . DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

5. Андрианов С.В. Контроль за закреплением заобделочного пространства методом георадиолокации на примере тоннелей метрополитена / Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». — М.: Изд-во «ПолиПРЕСС», 2018. — С. 623—626.

6. Андрианов С.В. Опыт применения георадиолокации при оценке качества инъекционного закрепления грунтового массива / Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» — М., 2018. — С. 365—368

7. Правительство Москвы. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. Руководство по проектированию и технологии выполнения работ по компенсационному нагнетанию в грунты основания для обеспечения сохранности зданий и сооружений при освоении подземного пространства в г. Москве. – М.: Изд-во «Инфра-инженерия», 2019. – С. 26-28.