МГУ имени М.В. Ломоносова

Кафедра сейсмометрии и геоакустики

№ госрегистрации
АААА-А16-116033010107-1

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан
_____
Гречкин Н.Н.
«__» декабря 2022 г.

УДК

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:
Разработка теории и технологии комплексных геофизических исследований приповерхностной части разреза естественных и техногенных сред
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе
_____
«27» декабря 2022 г.

Руководитель темы
Владов М.Л.
_____
«26» декабря 2022 г.

Москва 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:
заведующий кафедрой, кандидат геолого-минералогических наук, доктор физико-математических наук, профессор по кафедре — (Владов М.Л.)

Исполнители темы:
научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук — (Бричева С.С.)
ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук — (Ермаков А.П.)
профессор, доктор технических наук — (Жуков А.П.)
младший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук — (Капустин В.В.)
(Коротков И.П.)
ассистент, кандидат физико-математических наук — (Ошкин А.Н.)
научный сотрудник, кандидат технических наук — (Пятилова А.М.)
(Романчук А.Ф.)
ведущий специалист , кандидат технических наук — (Стручков В.А.)
старший преподаватель, кандидат физико-математических наук — (Судакова М.С.)
ассистент — (Турчков А.М.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:
разуплотнения, малоглубинная сейсморазведка, томография.микроспаркер, карст, лабораторные измерения, поперечные волны, оползни, неконсолидированные осадки., георадиолокация
Ключевые слова по-английски:
landslides, decompression, laboratory measurement, shallow seismic, karst, transverse waves, gpr, unconsolidated sediments., tomography.microsparker

Отчёт 196 стр., 19 источников РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ СРЕД НИР THE DEVELOPMENT OF THEORY AND TECHNOLOGY OF INTEGRATED GEOPHYSICAL STUDIES NEAR-SURFACE PART OF THE SECTION NATURAL AND INDUCED ENVIRONMENTS 7 этап НИР 1 января 2022 г.-31 декабря 2022 г. Разработка методик анализа динамических характеристик волновых записей упругих волн РЕФЕРАТ. В отчетный период госбюджетные работы велись по 7 направлениям.

1. Испытания технологичнски нового скважинного источника. В ходе испытания нового низкочастотного скважинного зонда были получены кондиционные данные, пригодные для анализа динамических характеристик. Частотная характеристика хорошая (косвенно) от 1 Гц. Для точный результатов анализа нужна четкая синхронизация начал записей на зонде и акселерометре, как опорной станции. Главные выявленные геологические границы – кровля глины и кровля известняка выражаются в записях очень резко. Причем, при создании мощного поля от механизма еще резче, но скорее всего здесь уже преобладают волны продольные. 2. Выполнены каротажи скважин и межскважинные просвечивания естественного разреза. По данным каротажей на поперечных волнах внутри самой толщи мелких песков необходимо выделить интервал отметок «-5м» - «-13м». Разброс значений скорости на отметке -9м от 460 м/с до 640 м/с, то есть почти в 1,5 раза, что соответствует изменению значений динамического модуля сдвига в 2 раза. Для толщи песков это означает, что на этой глубине в скважинах 2, 5, 9 и 10 имеют место максимальные значения динамического модуля сдвига до 650 МПа, что превышает практически вдвое значения, характерные для водонасыщенного песка в естественном залегании. Под глубинами прокладки коллектора располагается на всем протяжении его заложения зона грунтов с пониженными значениями скоростей распространения упругих продольных волн, ниже значений в 1600м/с на фоне более высоких значений скорости, что свидетельствует о понижении деформационных характеристик и разуплотнении этой области водонасыщенных песков. 3. Выполнено сейсмоакустическое исследования скважин техногенно-изменённого разреза. Результаты сейсмоакустического исследования скважин, включающего в себя два вида каротажей и межскважинные просвечивания с последующим томографическим обращением, позволили определить пространственных границы пустот и полостей в забутовке вспомогательных подземных выработок метрополитена. Интервал обследования определялся доступностью ствола скважины для приборов в момент исследования. Имеющиеся в ли-

тературе и используемые в практике корреляционные связи между упругими характеристиками грунтов и их прочностными свойствами дали возможность произвести оценки прочностных свойств исследуемых грунтов. 4. Выполнены наземные сейсмические наблюдения на поперечном типе волн. По результатам анализа динамических характеристик разрезов МОВ ОГТ было определено фактическое положение коллектора. По результатам наземной сейсморазведки было уточнено литологическое строение участка работ в межскважинном пространстве. По результатам наземной сейсморазведки на продольном типе волн было установлено положение уровня грунтовых вод на момент проведения работ. В перспективе подобные процессы могут привести к возникновению техногенной суффозии и небольшим просадкам в самом верхнем слое грунтов значительно выше самого коллектора. 5. Проанализирован потенциал применения отражённых волн в Межскважинном просвечивании на модельных и реальных данных. В рамках данного этапа работы был обработан и проанализирован существенный объем модельных и реальных данных, полученных в ходе работ методом МСП. В среде программирования «Matlab» был реализован инструмент, позволяющий проводить полный цикл процедур в рамках данного метода, начиная от процесса ввода кинематических поправок, до получения итогового изображения среды в поле отраженных волн. Как было доказано на примере реальных данных, опыт применения метода МСП-ОГТ, полученный в рамках данной работы, может быть успешно использован на практике. Данный метод выступает значительным дополнением к традиционной сейсмической томографии в методе МСП. 6. Выполнен анализ динамических характеристик радарограмм различных типов ландшафта. Проведенные исследования показали, что динамические характеристики радарограмм позволяют выделять границы ландшафтов, обнаруживать погребённые формы рельефа, изучать внутреннюю структуру положительных форм рельефа, а также выявлять структуру таких сложных непрерывно меняющихся во времени и пространстве объектов, как галоклин. Показано, что существенный прирост информации даёт совмещение георадарных исследований с морфометрическим анализом форм рельефа и измерениями физических свойств на образцах. 7. Выполнено георадарное зондирование техногенного разреза. В ходе зондирования дорожной были решены все поставленные задачи: выделены конструктивные слои, определены их толщины и скорости распространения электромагнитных волн в них.

Отчет составлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

ВВЕДЕНИЕ

Отчет за период выполнения 7 этапа НИР включает в себя 7 разделов, посвященных исследованиям в геофизических полях упругих волн и высокочастотных электромагнитных волн. Приведённые результаты исследований получены как на поверхности, так и в скважинах с применением различных методик и типов волн и охватывают весьма широкий круг вопросов от испытания аппаратуры к моделированию геофизических данных и получению количественных характеристик исследуемой среды. Одним из важных вопросов, которые возникают при оценке динамической устойчивости грунтов (и в целом ряде других ситуаций) является вопрос о поведении микросейсмического поля естественного происхождения и вибраций от техногенных источников с глубиной. Для экспериментальной оценки этой зависимости и ее особенностей на кафедре были разработаны и изготовлены действующие макеты низкочастотных скважинных зондов на базе пьезодатчиков давления. В разделе отчёта приводятся результаты испытания низкочастотного зонда в неглубоких скважинах. В октябре 2022 года на объекте «Коллектор» были проведены сейсмоакустические исследования скважин водонаполненных и обсаженных трубами ПВХ. Целью проведенных исследований было получение пространственных характеристик грунтов сейсмоакустическими методами. Такая задача возникла из-за нарушения положения коллектора, проложенного в массиве грунтов на площадке исследований. В рамках выполнения госбюджетной тематики задачей работ на первом этапе было получение материала о распространении упругих волн разных типов в толще водонасыщенных песков и построение трехмерного куба данных по кинематическим атрибутам волнового поля в массиве грунтов. На втором этапе исследований, отнесенном на 2023 год, предполагается анализ динамических атрибутов записи и построение уже динамического куба данных. Результаты приведены в разделе 2 отчёта. В разделе 3 отчёта приводятся результаты исследования прочностных характеристик массива природных карбонатных отложений, в которых был уложен тоннель метро, подлежащий заполнению цементным раствором для повышения несущей способности массива грунтов в целом. Цель работы состояла в получении и анализе записей волнового поля от электроискрового источника в водонаполненной скважине, обсаженной полиэтиленовой трубой. Для достижения данных целей был использован комплекс геофизических методов, включающий в себя сейсмоакустический каротаж и межскважинное сейсмоакустическое просвечивание. Пример анализа динамических характеристик сейсмических наземных данных приведён в разделе 4. Основными целями исследования являлись выявление зон разуплотнения, просадок и иных аномальных участков, наличие которых может негативно сказаться на возводимом объекте и установление фактического местоположения коллектора в грунтовом массиве. Для решения данной цели был использован комплекс геофизических методов, включающий в себя наземную сейсморазведку в модификации сейсмотомографии на продольном типе волн и сейсморазведку методом отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ ОГТ) на поперечном типе волн. В настоящей работе была предпринята попытка реализации такого метода обработки данных МСП, как метод параметризации системы координат глубинных точек, или же «Crosswell CDP» метод в зарубежной литературе (Smalley,

1991). Целью работы являлось полное освоение теоретических аспектов метода и реализации рабочего инструмента для осуществления процесса получения акустического изображения геологической среды по данному методу. Для достижения поставленных целей были использованы наборы как модельных данных, сгенерированных самостоятельно, так и реальных данных, полученных при инженерных изысканиях в Нижегородской области, г.Дзержинск. Раздел 5 посвящён ранее не применяющемуся в инженерной геологии анализу отражённых волн, полученных по методу МСП. На текущий момент времени основным результатом работ по методу МСП в инженерно-геологической отрасли является скоростной разрез продольных и/или поперечных волн, получаемый в ходе временной томографической (далее в работе – просто томографической) инверсии. Метод МСП-ОГТ, в свою очередь, предполагает получение классического изображения среды в поле отраженных волн, что по сравнению с томографической инверсией, позволяет восстановить геометрию контрастных границ и внедрить в получаемый результат информацию в полной волновой картине. На сегодняшний момент в открытых информационных источниках не существует научных трудов, в которых данный метод был задействован в применении к инженерным сейсморазведочным данным. Актуальность данной работы обоснована именно такой попыткой применения метода. В настоящей работе были широко задействованы различные программные решения. Для сигнальной обработки модельных и реальных данных была использована система «RadExPro» (Компания «RADEXPRO SEISMIC SOFTWARE LLC»). Для моделирования была задействована открытая python-библиотека «Devito». Для томографической инверсии была использована программа «ZondST2D» (Разработчик Каминский А.Е.). Помимо этого, было создано программное решение в среде «Matlab», позволяющее осуществлять полную обработку методом МСП-ОГТ. Вопросам распространения высокочастотных электромагнитных волн в естественных и техногенных средах, слагающих приповерхностную часть геологического разреза, посвящены разделы 6 и 7 настоящего отчёта. В отчётном году была завершена работа по выделению границы между моренно-водноледниковым и долинно-зандровым ландшафтами комплексом методов георадиолокации (50 и 250 МГц) и электротомографии с шагом 1 м между электродами. Исследования проводились в прошлом году на ландшафтном стационаре Географического ф-та МГУ «Лесуново» совместно с к.ф.-м.н. А.А. Бобачёвым (МГУ). Помимо геофизических методов применялись классические ландшафтные исследования и бурение. Завершено исследование ложбины водотока, располагавшегося на территории ныне не существующего Златоустовского монастыря в Москве. В отчётном периоде было завершено изучение поля гигантской ряби методом георадиолокации совместно с морфометрическим анализом поверхности. При помощи георадиолокации было изучено строение более чем 50 гряд в разных частях поля, выделены их особенности и типы в зависимости от расположения в пространстве. Проведены первые опытно-методические работы по изучению пространственной динамики границы речного плюма р. Бзыбь. Исследована связь динамических характеристик георадарограмм и свойств песчано-глинистого разреза. В рамках сопоставительных испытаний отечественных георадаров для более точного определения глубины границ и заверки данных георадиолокационного профилирования были выполнены работы методом георадиолокационного зондирования (раздел 7 отчёта).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Раздел 1. Испытания низкочастотного зонда Введение. Поля динамических напряжений (вибрационные поля), наряду с полями статических напряжений, существуют в массивах грунтов и в сооружениях. Интенсивность этих полей меняется в течение суток в зависимости от режима техногенных и природных процессов. Наличие вибрационных полей может приводить к образованию дополнительных деформаций в грунтовых основаниях и в самих сооружениях, изменять скорость течения негативных геологических и антропогенных процессов (суффозия, оползни, просадки и т.п.). Методы вибродиагностики, широко применяющиеся в технике (диагностика механизмов и деталей), в составе инженерно-геологических изысканий стали применяться лишь недавно. При этом на этапе изысканий измерение параметров вибрационных полей производится для оценки динамической устойчивости территории изысканий при большой площади объекта застройки (рис.1). Необходимость оценки динамических свойств грунтов оснований при наличии источников динамических нагрузок регламентируется действующими нормативными документами (СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. СП 22.13330.2016. Основания зданий и со¬оружений. СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с ди¬намическими нагрузками (с изменением №1). СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. СП 269.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования. СП 446.1325800.2019. Инженерно- геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.), для их корректной и обоснованной оценки требуются реальные характеристики существующих или ожидаемых воздействий. В ходе изысканий следует определять преобладающие частоты колебаний грунтов, значения максимальных и действующих амплитуд динамических напряжений, а также ряд других характеристик колебаний. Для некоторых сооружений (автомобильные и желез¬ные дороги, метрополитен) дополнительно выполняется прогноз действия техногенных вибраций на грунтовые массивы и окружающую застройку в период строительства и эксплуатации объектов. Учет воздействия вибраций также производится при определении участков, неустойчивых к щитовой проходке грунтов, расчете устойчивости оползневых склонов и т.п. И если поведение динамически неустойчивых грунтов изучается достаточно активно, то вли¬яние вибраций на скорость процессов массопе¬реноса в них пока остается вопросом открытым. В период строительства измерение вибраций производится при забивке и вибропогружении свай, шпунтов и оболочек, проходке тоннелей, работе строительной техники с целью оценки влияния на грунты и сооружения. Для оценки влияния вибраций на здания определяются собственные частоты колебаний зданий и передаточные характеристики между отдельными его частями. Для наиболее ответственных и подверженных вибрационному воздействию сооружений мониторинг ведется весь период строительства. В период эксплуатации сооружений измерения вибраций используются в системах мониторинга высотных и большепролетных зданий, железнодорожных и автомобильных насыпей, тоннелей и т.д. Характер воздействия вибраций на грунты и сооружения, в отличие от действия землетрясений, часто определяется не величиной амплитуды, а длительностью действия. При

длительных интенсивных воздействиях может наблюдаться нелинейное поведение грунтов. Негативное действие вибраций на грунты обычно сосредоточено в самой верхней части разреза, где динамические нагрузки могут превысить значения давления в поровой жидкости, а эффективные сжимающие напряжения в скелете грунта сравнитель¬но невелики. Многие методические приемы при проведении работ по виброметрии могут быть заимствованы из инженерной сейсмологии. При районировании территории по степени динамической устойчивости требуется определение сейсмических жесткостей и динамических модулей деформации грунтов по разрезу. Сигналы, регистрируемые в инженерной сейсмологии, виброметрии и инженерной сейсморазведке имеют значительные амплитуд¬ные, частотные и временные различия. Однако в действующих нормативных документах не рассматривается вопрос о частотном диапазоне, в пределах которого вибрационное воздействие можно считать опасным. Проведение натурных измерений динамических полей и корректное моделирование динамического воздействия на грунты в лабораторных условиях направлено на решение сле-дующих основных задач: -определение скорости распространения динамического воздействия, коэффициента затухания, коэффициента передачи сейсмиче¬ского воздействия от грунтового массива к со¬оружению, оценку действующих в грунтовом массиве значений динамических напряжений; -оценку изменения физико-механиче¬ских характеристик грунта при действии дина¬мических нагрузок; -районирование территорий по степени устойчивости к динамическим воздействиям; -определение динамики и величины до¬полнительных осадок грунта и оценка устойчи¬вости земляных сооружений; -прогноз влияния источников вибрации на проектируемые объекты. Техногенное вибрационное поле на застроенных территориях, источниками которого являются транспорт и работающие механизмы, как уже отмечалось, может достигать интенсивности, оказывающей влияние на свойства грунтов и развитие ряда геологических процессов. В связи с этим изучение влияния вибраций на геологическую среду и литотехнические системы в целом приобретает все большее значение. Если изучение динамического воздействия на грунты от землетрясений имеет уже давнюю историю, то в вопросах действия техногенных вибраций еще много пробелов. Методика оценки динамического воздействия землетрясений на массивы грунтов далеко не во всех случаях подходит и для изучения эффекта техногенных вибраций. Это связано с различиями в протекании данных процессов. Несомненно, что многие положения инженерной сейсмологии в отношении распространения волн и оценки их влияния на грунтовые массивы могут быть заимствованы для изучения вибраций. Однако основные различия начинаются уже в свойствах источников соответствующих возмущений. Землетрясение можно считать детерминированным процессом: интенсивность, положение очага (источника) и основные параметры его волнового поля могут быть измерены и определены. Вибрационное поле в большинстве случаев нужно рассматривать как результат случайного процесса, порождаемого суперпозицией многочисленных источников как неподвижных, так и движущихся. Эта модель, как правило, соответствует вибрационному полю больших городских агломераций и промышленных районов. Во многих случаях изучение динамического воздействия на грунтовые массивы происходит в ближней зоне (зоне излучения) техногенных источников, где традиционные подходы к изучению волновых полей могут быть неприменимы.

В отличие от источников сейсмических воздействий, техногенные источники могут быть движущимися и распределенными, а не только локальными. И только в отдельных случаях положение техногенного источника может быть локализовано, а его параметры оценены в рамках детерминированной модели.

Постановка задачи исследований Одним из важных вопросов, которые возникают при оценке динамической устойчивости грунтов (и в целом ряде других ситуаций) является вопрос о поведении микросейсмического поля естественного происхождения и вибраций от техногенных источников с глубиной. Для экспериментальной оценки этой зависимости и ее особенностей были разработаны и изготовлены действующие макеты низкочастотных скважинных зондов на базе пьезодатчиков давления. Таким образом, задачами эксперимента были оценка возможности макетов и измерения микросейсмического волнового поля давления вдоль ствола водонаполненной скважины.

Раздел 1. 1.Аппаратура. Наземная аппаратура. Измерения микросейсм проводилось с помощью аппаратурного комплекса «Дельта 03-м» производства ООО «ЛОГИС» г.Раменское с использованием трехкомпонентных акселерометров. Обработка данных проводилась с помощью программного пакета «Вибро-СО», разработанного в ООО «НИИ Геотех» (Рис. 1). Комплекс позволяет проводить измерения динамических полей в частотном интервале 0-200 Гц и определять основные параметры динамических полей, необходимые для анализа микросейсмического поля. В процессе проведения полевых работ было проведено измерение динамических полей в точках расположенных вблизи устья скважин. Поскольку, речь идет об измерениях микросейсм в скважине, наземная станция играла роль опорной вариационной для фиксации изменений поля во времени. Скважинные зонды – действующие макеты (элементы техзадания). Одноканальный зонд. 1.Полоса пропускания 1- 100 Гц. 2.Основа – параллельно-последовательное соединение пьезоприемников типа ПДС-21, Бентос и т.п. 3. Выходное сопротивление - первые сотни Ом. Возможен вариант со встроенным парафазным усилителем. 4.На стадии макета возможно исполнение нацело с кабелем, без разъема. 5. Длина кабеля не менее 150 м. 6.Диаметр зонда – не более 50 мм. 7. Концевой разъем должен соответствовать станции «ГЕОН-3». 4-х канальный зонд. Должен представлять собой гирлянду из 4-х одноканальных секций (см. выше) с интервалом между приемниками 1 м. Назначение – градиентная установка.

Раздел 1.2. Методика наблюдений. В июне сего года на Кленовом бульваре в г. Москве были проведены измерения микросейсмического фона по следующей схеме (рис.1. 2.1). 1. В течение всего цикла из 20-ти минутных измерений в каждой из скважин на каждой позиции по глубине с шагом 1 м. производилась непрерывная запись с помощью трехкомпонентного акселерометра на устье этой скважины. 2.Регистрация сигналов со скважинного зонда производилась на отдельную многоканальную станцию «ГЕОН-3». 3. Регистрация сигналов производилась в двух режимах. В режиме «тишина» механизм в котловане не работал, а в режиме «механизм» - работал. В режиме «тишина» предполагалось, что приборы регистрируют суммарное воздействие микросейсмического фона (в сейсмологическом смысле) в сумме с городским шумом техногенного происхождения. При этом, следуя гипотезам из многочисленных литературных источников, суммар-

ное это воздействие распространяется вдоль земной поверхности в виде поверхностных волн. В случае работы механизма (режим «механизм») можно предположить, что энергия регистрируемых сигналов сосредоточена в объемных волнах различной поляризации. После предварительной обработки записей -выделение и синхронизация фрагментов записей в скважине и на поверхности, идентификации каналов в многоканальном зонде и конвертирования формата записи .ddb («ГЕОН») в формат .sgy производился анализ и обработка записей. Раздел 1. 3. Обработка и анализ записей. Измерения проводились 20-ти минутными циклами для каждого положения зонда в скважине. По причинам технического характера (см. Дефектную ведомость) рассмотрены материалы только для 4 канала зонда с записью на 4 канал станции «ГЕОН» № 3034. Прием колебаний на трехкомпонентный акселерометр на устье скважины проводился непрерывно с регистрацией на станцию «ГЕОН» №3066. В период проведения эксперимента время от времени начинал работать механизм в котловане. На записях зонда на каждой фиксированной глубине и акселерометра на поверхности выделены временные интервалы, когда механизм не работал - «тишина», в предположении, что в эти интервалы происходила запись микросейсмического фона города. Выделены также интервалы записей, соответствующих времени работы механизма («механизм»). Ниже приводятся примеры интервалов записей и модулей их спектров для одинаковых интервалов времени записи с 4-го канала зонда на каждой из глубин от 10 до 50 метров с шагом 5 метров и акселерометра на устье скважины. На рисунке 1. 3.1 представлен пример записи микросейсмического фона на глубине 45 м и ее модуль спектра Фурье. На рисунке 1. 3.2 представлен пример записи микросейсмического фона и модули спектров, зарегистрированных трехкомпонентным акселерометром на устье скважины. Везде величины спектральной плотности представлены в электрических единицах (мВ и мкВ) по входу усилителя регистратора. Учет суммарного коэффициента усиления в канале регистрации не проводился. Обращает на себя внимание аномально высокий уровень электромагнитной наводки 50 Гц и, даже, ее половинной частоты 25 Гц. Возможные причины – сырость и недостаточно хорошо выбранная точка заземления приборов. На рисунке 1. 3.3 представлен пример записи с 4 канала зонда на глубине 45 м во время работы механизма. Обращает на себя внимание преобладающая частота работы механизма, около 30 Гц и высокая амплитуда этих колебаний. Амплитуда, по-видимому превышает порог линейного поведения грунтов, так как хорошо видна кратная частота. На рисунке 1. 3.4 представлен фрагмент записи и модули спектров, зарегистрированных трехкомпонентным акселерометром на устье скважины во время работы механизма. Здесь также хорошо видны основная и кратная частоты работы механизма.

На рисунке 1. 3.5 приведено поведение модуля полного вектора при трехкомпонентной записи с акселерометра на устье скважины во времени в период регистрации. Двадцатиминутные интервалы записи, для которых модуль вычислен по средним амплитудам компонент обозначены как глубины, на которых находился скважинный зонд. На рисунке 1. 3.6 представлены величины локальных максимумов модулей спектров записей на 4-ом канале зонда, нормированные на величины полного вектора по записям акселерометра на устье скважины в периоды тишины. Теоретические представления о затухании горизонтальной компоненты поверхностной волны в однородно-слоистой среде – основа современного сейсмического метода изучения ско-

ростей поперечных волн MASW (рис.1. 3.7 , 1. 3.8). Представление о затухании компонент поверхностной волны от глубины и значений коэффициента Пуассона в однородной среде. Примерно также будет выглядеть давление, которое мы меряем в скважине. Эксперимент показывает жесткую зависимость от геологии. Ниже приводятся результаты измерений «сильных» напряжений, когда в котловане рядом работал механизм. На рисунке 1 .3.9 приведено поведение модуля полного вектора при трехкомпонентной записи с акселерометра на устье скважины во времени в период регистрации. Двадцатиминутные интервалы записи, для которых модуль вычислен по средним амплитудам компонент обозначены как глубины, на которых находился скважинный зонд. Записи производились в период работы механизма. На рисунке 1. 3.10 представлены величины локальных максимумов модулей спектров записей на 4-ом канале зонда, нормированные на величины полного вектора по записям акселерометра на устье скважины в периоды работы механизма. Раздел 1.4. Дефектная ведомость 4-х канального зонда. 19 июня были произведены испытания действующего макета низкочастотного скважинного зонда для регистрации микросейсмического фона. Записи производились в водонаполненных скважинах на глубинах от 50 до 10 метров с шагом 5 метров по 20 минут на каждой глубине. Регистрация велась на «Дельта-Геон 3» -четырехканальный. В результате первого цикла испытаний получены следующие результаты. На рис.1.4.1 представлена запись по четырем каналам с одинаковым усилением вскоре после погружения зонда на глубину 50 метров по нижнему каналу. Необходимо отметить следующие особенности. 1.Различная для разных каналов и меняющаяся во времени постоянная составляющая, достигающая единиц милливольт при уровне полезного сигнала в единицы микровольт. 2.Различная для разных каналов чувствительность, отличающаяся для 1 и 4 каналов на 2 порядка. Возможная причина дефекта- недостаточная герметизация каналов, попадание воды (затекание) и влияние на работу электрической схемы прибора. На рисунке 1.4.2 представлены записи и нормированные модули спектров по прошествии более, чем трех часов с начала размещения зонда в скважине. Необходимо отметить следующие особенности. 1.Постоянная составляющая уменьшилась на канале 3, оставаясь очень большой на каналах 1 и 2 . 2. При уменьшении гидростатического давления и увеличения уровня полезного сигнала, каналы несколько «выравниваются». Подтверждается предположение о «затекании» каналов, когда большую роль играют время пребывания в воде и изменения гидростатического давления. Ожидаемые действия производителя – стендовая проверка идентичности каналов и проверка герметизации с устранением дефекта. Раздел 1. 5. Дефектная ведомость одноканального зонда. 25 июня были произведены испытания действующего макета низкочастотного скважинного зонда производства ООО «Геодевайс» для регистрации микросейсмического фона. Записи производились в водонаполненных скважинах на глубинах от 59 до 21 метров с шагом, в основном, 5 метров по 20 минут на каждой глубине. Регистрация велась на «Дельта-Геон 3» -четырехканальный. В результате первого цикла испытаний получены следующие результаты. На рис.1.5.1 представлена запись зонда вскоре после погружения зонда на глубину 59 метров и спектр записи в трех горизонтальных масштабах. На глубинах 50 м., 45 м., 40 м. записи по величине постоянной составляющей, низкому амплитудному уровню записи с небольшим ростом похожи на представленные выше. На

рис.1.5.2 представлена запись с акселерометра на устье скважины в этот же интервал времени. Для оценки уровня и спектра микросейсмического фона на поверхности. Далее представлены последовательно записи зонда на глубинах 35 м., 30м., 25 м. и 21 м. На рис. 1.5.3 представлена запись зонда на глубине 55 м. Таким образом, некоторый сигнал похожий на ускорения на поверхности по амплитудам и спектральному составу появляется на глубине 21 м. Наиболее вероятной причиной такого поведения зонда в скважине является совместное воздействие воды и давления. Корпус зонда не герметичен. Предположение о естественном падении уровня сигнала микросейсмического фона неверно, так как измерения с 4-х канальным зондом в этих же условиях показали падение уровня сигнала с глубины 20 м до глубины в 50 м не более, чем в 2 раза даже для самых низкочастотных составляющих. Предварительные выводы. По аппаратуре и методике. Были получены кондиционные данные, пригодные для анализа динамических характеристик. Частотная характеристика хорошая (косвенно) от 1 Гц. Для точный результатов анализа нужна четкая синхронизация начал записей на зонде и акселерометре, как опорной станции. Главные выявленные геологические границы – кровля глины и кровля известняка выражаются в записях очень резко. Причем, при создании мощного поля от механизма еще резче, но скорее всего здесь уже преобладают волны продольные. Распределение поля по глубине очень сильно зависит от геологии, что известно. Однако, для построения корреляционных связей между геологическими и сейсмическими характеристиками необходимо проведение дополнительных исследований. Общие кривые зависимости амплитуд гармоник в волне Релея в инженерных работах весьма далеки от моделей, применяющихся в методе MASW.

Раздел 2. Оценка суффозионной опасности Введение В октябре 2022 года на объекте «Коллектор» были проведены сейсмоакустические исследования скважин водонаполненных и обсаженных трубами ПВХ. Целью проведенных исследований было получение пространственных характеристик грунтов сейсмоакустическими методами. Такая задача возникла из-за нарушения положения коллектора, проложенного в массиве грунтов на площадке исследований. В рамках выполнения госбюджетной тематики задачей работ на первом этапе было получение материала о распространении упругих волн разных типов в толще водонасыщенных песков и построение трехмерного куба данных по кинематическим атрибутам волнового поля в массиве грунтов. На втором этапе исследований, отнесенном на 2023 год, предполагается анализ динамических атрибутов записи и построение уже динамического куба данных. При выполнении работ использовались 2 метода – сейсмоакустический каротаж скважин и межскважинные сейсмоакустические просвечивания с последующим томографичесим обращением. Раздел 2. 1.Краткая характеристика объекта исследований На рис.2.1.1 представлена схема участка работ с местами расположения скважин и положением коллектора на плане. Раздел 2. 2. Проделанные работы и материалы На рисунке 2.2.2 представлена схема межскважинных просвечиваний. Рис.2.2.2 Линии, соединяющие скважины – проекции плоскостей просвечивания. Таким образом, проведены каротажи 10 скважин по всей глубине с шагом 1 м, как на постоянной базе, так и при размещении источника на забое. Проведены межскважинные просвечивания для 16 интервалов между скважинами. При этом 8 плоскостей просвечиваний пересекают коллектор.

Перемещение источника по глубине составляло 1 м. Для каждого положения источника получены записи всех положений приемников в соседней скважине с шагом по глубине в 1 м. В итоге получены 10 записей для каротажей на постоянной базе (дифференциальный каротаж) и 10 записей при размещении источника на забое скважин (потенциальный каротаж). Раздел 2.3. Аппаратура и методика проведения геофизических работ Виды и объёмы геофизических работ составлены в соответствии с требованиями нормативных документов СП 47.13330.2016, СП 11-105-97 часть 6, РСН-66-87 и других действующих нормативных актов. Сейсмоакустический каротаж был проведен в скважинах с водой на дневной поверхности. Наблюдения проводились с неподвижным электроискровым источником, 1-канальным зондом (датчиком давления), интервал наблюдения составил по 27 метров для скважин №№ 1-10 с шагом 1 м. Сейсмоакустические томографические просвечивания были проведены между 16 парами скважин-см. рис.2. Просвечивание проводилось между скважинами с водной укупоркой, пробуренными на дневной поверхности, с регистрацией продольных волн в первых вступлениях; с 12-канальной косой с расстоянием между сейсмоприемниками 1 м. Электроискровой источник упругих волн (ЭДИВ-1), разработанный на кафедре сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, включает в себя емкостной накопитель электрической энергии, высоковольтный ключ, блок синхронизации, энергомагистраль, выполненную на коаксиальном кабеле, и, собственно, излучатель. При проведении сейсмоакустических исследований величина накопленной энергии изменялась в соответствии с физико-геологическими условиями и составляла от 0.7 до 5 кДж при напряжении 6 кВ. Накопительная часть и блок управления энергоустановкой ЭДИВ-1 располагается на поверхности земли (помещение, транспортное средство). В состав ЭДИВ-1 входят: блок зарядного устройства (ЗУ), преобразующий переменное напряжение 220В в постоянное напряжение 6000В, блок конденсаторов с тиристорным ключом (БКТ), формирующий электрический разряд в воде (базовая комплектация). Дополнительно к базовой комплектации ЭДИВ-1 может комплектоваться одним или двумя блоками конденсаторов без тиристорного ключа (БК), увеличивающими энергию разряда на 1-2кДж. Блоки ЭДИВ-1 защищены от механических и климатических воздействий и рассчитаны на функционирование в диапазоне температур от + 40ºС до минус 5ºС и относительной влажности до 95% при температуре 25ºС. Питание ЭДИВ-1 осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 190-240В. Мощность, потребляемая ЭДИВ-1 от сети не более 2500ВА. Режим работы ЭДИВ-1 длительный – не менее 8 часов непрерывной работы. Габаритные размеры блоков ЭДИВ-1 (высота×ширина×глубина) – 420×400×140 мм. Масса источника ЭДИВ-1 (базовая комплектация – ЗУ + БКТ) – 24 кг. Максимальное напряжение заряда конденсаторной батареи БКТ и БК – 4800 В. Внешний вид блока электроискрового возбуждения ЭДИВ представлен на Рис. 3. Скважинный излучатель – преобразователь электрической энергии в энергию упругой волны (спаркер). Представляет собой размещенный на конце коаксиального кабеля – токоведущей магистрали – отрезок прорезиненного шланга, в котором размещены разрядные электроды, заполненного электролитом – раствором NaCl (поваренной соли). Внешний вид спаркера представлен на Рис.2.3.2.

В качестве приемника колебаний используется трехканальная пьезоко-

са, выполненная на основе пьезодатчиков ПДС-21, с установленным на каждый канал дифференциальным предусилителем. Предусилитель, расположенный в непосредственной близости от датчиков, а также сплошное экранирование приемных элементов и сигнальных проводов приводит к низкому уровню наведенных помех и высокому соотношению сигнал/шум. Пьезоэлектрические преобразователи, используемые в пьезокосе, обеспечивают полосу пропускания до 5000 Гц. Необходимо отметить, что в лучших современных конструкциях прижимных приемников смещения не удается обеспечить полосу пропускания выше 1000-1500 Гц, в то же время установлено, что частота продольной волны при каротажных исследованиях с электроискровым источником может достигать 2000 Гц. Пьезоприемник давления сейсмический ПДС-21 предназначен для регистрации сейсмических волн (динамического давления) в диапазоне частот 5 – 6000 Гц при проведении морских и скважинных сейсмических исследований. Пьезоприемник входит в комплект многоканальных приемных устройств для морской и скважинной сейсморазведки. Внешний вид приемной косы представлен на Рис.2.3.2. Технические характеристики пьезоприемника приведены в таблице 1. Рис.2.3.3. Приемная двенадцатиканальная скважинная сейсмокоса

Система сбора – аналого-цифровой преобразователь E14-440. АЦП (аналого-цифровой преобразователь) является основой системы сбора цифровых данных. Внешний вид АЦП приведен на Рис. 6. Подробно техника и методика проведения каротажа (вертикального сейсмического профилирования) изложена в [Гальперин, 1982; Электроискровой источник для целей наземной сейсморазведки,1989, Применение…, 1992]. Пример сейсмограммы, полученной при сейсмоакустическом каротаже в скважине при размещении источника на фиксированной глубине и перемещающемся приемнике, представлен на рисунке 2.4.1. Раздел 2.4. Обработка полевых данных каротажа Определение скоростей: определение пластовых скоростей по данным сейсмоакустических исследований осуществляется с помощью ряда приемов. Первый этап заключался в прослеживании на сейсмограммах первых и последующих вступлений продольных и гидроволн, а также в построении по снятым с сейсмограмм временам продольных вертикальных годографов. По временам пробега гидроволн определяются скорости распространения поперечной S-волны в околоскважинном пространстве (Электроискровой источник упругих волн…, 1989). Рис.2.4.1 Каротаж при непрерывном подъеме приемника.1-прямая продольная волна по грунту; 2-поле вторичных отраженных гидроволн от слоев, линз и других неоднородностей разреза; 3- прямая гидроволна источник информации о модуле сдвига в околоскважинном массиве. По горизонтали отложено время в мс. По вертикали глубина скважины в м. На рисунке 2.4.2 представлена запись дифференциального каротажа на базе 1м при непрерывном подъеме связки «источник-приемник». Рис.2.4.2 Дифференциальный каротаж в скважине 1. 1-вступления прямой продольной волны; 2-вступления поперечной волны; 3- вступления гидроволны. Пикировки волн проводятся по записям, полученным методом отклонений с зачернением положительных амплитуд. Далее годографы подвергаются дифференцированию с целью получения интервальных скоростей. Полученные по результатам каротажа значения пластовых скоростей служат основанием для расчета динамических модулей, таких, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона. , где Vp, Vs, и ρ – скорость продольных волн, скорость поперечных волн и плотность соответственно. - модуль Юнга: , - мо-

дуль сдвига: , [Гурвич И.И., Боганик В.Н. Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1986] В результате проведения сейсмоакустических исследований были получены и проинтерпретированы кривые скоростей продольных волн, трубных гидроволн и поперечных волн, составлены и заполнены таблицы (Приложение А): Vp, м/с (интервальная скорость продольных волн) Vg, м/с (интервальная скорость гидроволн) Vs, м/с (интервальная скорость поперечных волн) rho, г/см3 (плотность – по данным заказчика) Vs/Vp (отношение скоростей продольных и поперечных волн) G сдвига, Мпа (модуль сдвига) σ Пуассона (коэффициент Пуассона) Е Юнга (Ед), Мпа (модуль Юнга, динамический модуль) Е деф, Мпа (модуль деформации – по корреляционной зависимости для песчано-глинистых грунтов природной влажности Едеф=0.064Ед+3.5; коэффициент корреляции 0.91, СП 11-105-97 часть VI, 2004 г.)

Раздел 2.5. Методика межскважинного сейсмоакустического просвечивания

Рис.2.5.1 Общая схема межскважинных просвечиваний

Просвечивание между скважинами осуществляется по схеме «для каждой точки возбуждения – все точки приема» (Электроискровой источник для целей наземной сейсморазведки,1989.) Пример лучевой схемы просвечиваний приведен на Рис.2.5.1. При постановке задачи об изучении скоростного разреза продольных волн и в качестве начального приближения модели разреза используется кривая зависимости средней скорости пробега по лучу от источника к приемнику при размещении источника и приемника на одинаковых глубинах в двух скважинах – так называемое параллельное просвечивание, а также данные о скоростях по каротажам. На Рис. 2.5.2 представлен пример сейсмоакустической записи с преобладающей частотой колебаний 600 Гц, полученный при размещении источника на глубине 9 м и приемной 12-ти канальной косы в соседней скважине в интервале глубин -2 - -25м (от устья скважины). После получения таких картин для каждого 12-ти метрового интервала при перемещении источника в соседней скважине по всей ее глубине с шагом 1 м производится пикировка времен пробега волн (синяя линия.)

По результатам сейсмоакустических просвечиваний выполняются томографические обращения, позволяющие получать разрезы в изолиниях скоростей распространений продольных волн. Раздел 2.5. Результаты скважинных работ Результаты сейсмоакустического каротажа скважин Необходимо отметить, что геологические колонки скважин различаются в основном по строению верхних 5 метров разреза. В зависимости от местоположения скважины это техногенный грунт небольшой мощности и ниже глистые и суглинистые слои с прослоями песка. Ниже этой толщи, в которой располагается УГВ, мощная толша водонасыщенных песков мелких и пылеватых с мелкими линзами опесчаненных глин. В то же время, по данным каротажа эта толща заметно меняется от скважины к скважине. На рис. 2.5.1 представлены скоростные кривые для продольных волн по всем 10 скважинам и геологическая колонка по скважине 1 для ориентировки по литологии грунтов на разных глубинах. По значениям скоростей продольных волн можно сделать следующие выводы. 1.Верхняя часть разреза, до глубин порядка 5 м от устья скважин характеризуется нарастанием скорости волн от значений 1100-1300 м/с, характерных для маловлажных суглинистых пород, до значений 1700 – 1900м/с, что характерно для водонасыщенных пород, со-

держащих большое количество глинистых частиц. 2.Внутри самой толщи мелких песков скорость с глубиной растет 100-200 м/с, что соответствует увеличению горного давления с глубиной. 3. Особняком стоят скважина 3 и скважина 9. Особенно это заметно в интервале отметок «-5 м» - «-13 м». Здесь значения скоростей продольных волн на 200 -300м/с меньше, чем в среднем по другим скважинам. Необходимо отметить, что по остальным скважинам (кроме скважин 3 и 9) в этом интервале абсолютных отметок наблюдается также большой разброс скоростей вокруг среднего значения. На рис. 2.5.2 представлены скоростные кривые для поперечных волн по всем 10 скважинам и геологическая колонка по скважине 1 для ориентировки по литологии грунтов на разных глубинах. о значениям скоростей поперечных волн можно сделать следующие выводы. 1.Верхняя часть разреза, до отметок порядка -5 м характеризуется нарастанием скорости волн от значений 400-480 м/с (при среднем значении 440 м/с), характерных для маловлажных суглинистых пород, до значений 480 –560 м/с, (при среднем значении 510 м/с) что характерно для водонасыщенных пород, содержащих большое количество глинистых частиц. 2.Внутри самой толщи мелких песков необходимо выделить интервал отметок «-5м» - «-13м». Разброс значений скорости на отметке -9м от 460 м/с до 640 м/с, то есть почти в 1,5 раза, что соответствует изменению значений динамического модуля сдвига в 2 раза. Для толщи песков это означает, что на этой глубине в скважинах 2, 5, 9 и 10 имеют место максимальные значения динамического модуля сдвига до 650 МПа, что превышает практически вдвое значения, характерные для водонасыщенного песка в естественном залегании. 3. Ниже отметки в -13м скорость поперечных волн практически не меняется с глубиной и в среднем по скважинам составляет 510 м/с.

Результаты межскважинного сейсмоакустического просвечивания Ниже, на ряде рисунков представлены результаты межскважинного просвечивания на площадке работ в изолиниях значений скорости продольных волн после томографического обращения. Разрезы, пересекающие коллектор. На рис.2.5.3 представлен разрез между скважинами 1 и 6. Рис.2.5.3 Скоростной разрез между скважинами 1 и 6. В верхней части разреза, вблизи поверхности в юго-восточном углу площадки работ выделяется более плотный участок разреза, имеющий, по-видимому, техногенное происхождение. Зона более рыхлых обводненных грунтов со значениями скорости продольных волн в 1600 м/с опускается в средней части разреза до отметок -11 м. На рисунке 2.5.4 представлен разрез между скважинами 2 и 7. Рис. 2.5.4 Скоростной разрез между скважинами 2 и 7. Под приповерхностным слоем техногенных и глинистых грунтов в толще водонасыщенных песков выделяются две области – область относительно повышенной скорости условно названная «областью коллектора» на отметках «-8 м» - «-9 м» на расстоянии 14 м. от скважины 2 и область пониженных значений скорости, названная «областью разуплотнения» с центром на отметке -11м и на расстоянии 9,5 метров от скважины 2. На рисунке 2.5.5 представлен разрез между скважинами 2 и 8. Рис. 2.5.5 Скоростной разрез между скважинами 2 и 8. Под приповерхностным слоем техногенных и глинистых грунтов в толще водонасыщенных песков выделяются две области – область относительно повышенной скорости условно названная «областью коллектора» на отметках «-7 м» - «-8 м» на расстоянии 10 м. от скважины 2 и область пониженных значений скорости, названная «областью разуплотнения» с центром на отметке -10м

и на расстоянии 11метров от скважины 2. На рисунке 2.5.6 представлен разрез между скважинами 7 и 3.

Рис. 2.5.6 Скоростной разрез между скважинами 7 и 3. На этом скоростном разрезе не выявлено областей относительного уплотнения и разуплотнения – скорость продольных волн равномерно повышается с глубиной. При этом, быстрее в области скважины 3. На рисунке 2.5.7 представлен разрез между скважинами 3 и 8.

Рис. 2.5.7 Скоростной разрез между скважинами 3 и 8.

Под приповерхностным слоем техногенных и глинистых грунтов в толще водонасыщенных песков выделяются две области – область относительно повышенной скорости условно названная «областью коллектора» на отметках «-6,5м» - «-7,5 м» на расстоянии 10 м. от скважины 3 и область пониженных значений скорости, названная «областью разуплотнения» с центром на отметке –9,5 м и на расстоянии 12метров от скважины 3. На рисунке 2.5.8 представлен разрез между скважинами 9 и 4.

Рис.2.5.8. Рис. 2.5.9 Скоростной разрез между скважинами 4 и 10.

Под приповерхностным слоем техногенных и глинистых грунтов в толще водонасыщенных песков выделяются две области – область относительно повышенной скорости условно названная «областью коллектора» на отметках «-6,5м» - «-7,5 м» на расстоянии 8,5 м. от скважины 4 и область пониженных значений скорости, названная «областью разуплотнения» с центром на отметке –9,5 м и на расстоянии 10 метров от скважины 4. На рисунке 2.5.10 представлен разрез между скважинами 5 и 10. Рис.2.5.10 Рис.2.5.11 На рисунках 2.5.12 – 2.5.13 представлены скоростные разрезы между скважинами 6-7,7-8 по линии вдоль северного борта площадки работ. Рис.2.5.12 Рис.2.5.13 Приведенные скоростные разрезы вдоль бортов площадки показывают отсутствие ярко выраженных локальных зон разуплотнения. В то же время, прогибание изолинии скорости 1600 м/с в среднем до 11 метров по глубине, а на сечении между скважинами 6 и7 до 15 м указывает на относительное разуплотнение в песках на фоне общего роста скорости с глубиной. Объемное представление результатов просвечиваний. На рисунках 29 - представлены 3-хмерные реконструкции массива грунтов в разных проекциях для лучшей визуализации результата. На рисунок вынесены объемы грунта со значениями скорости продольных волн больше 1600 м/с представлены в коричневых тонах. Это объемы наиболее акустически жесткие и менее подверженные суффозии. Зеленым цветом показаны объемы грунтов в приповерхностной части разреза со скоростями продольных волн менее 1400 м/с, наименее акустически жесткие. Фиолетовые стрелки указывают на «отверстия» в межскважинных разрезах. Это области разуплотнения под коллектором со скоростями распространения волн менее 1600 м/с в массиве песков. Более точные координаты этих областей можно найти на приведенных выше скоростных разрезах. Заключение I.Каротажи скважин . По данным каротажей на продольных волнах вся толща разбивается по глубине на 2 интервала : от поверхности и до отметки -8 м –высокий положительный градиент скорости, характерный для сухих сверху и водонасыщенных ниже УГВ песчано-глинистых пород. Ниже отметки -8 м скорость в среднем по скважинам нарастает плавно в соответствии с увеличением горного давления в песках. Особняком стоят скважина 3 и скважина 9. Особенно это заметно в интервале отметок «-5 м» - «-13 м». Здесь значения скоростей продольных волн на 200 -300м/с меньше, чем в среднем по другим скважи-

нам. По данным каротажей на поперечных волнах внутри самой толщи мелких песков необходимо выделить интервал отметок «-5м» - «-13м». Разброс значений скорости на отметке -9м от 460 м/с до 640 м/с, то есть почти в 1,5 раза, что соответствует изменению значений динамического модуля сдвига в 2 раза. Для толщи песков это означает, что на этой глубине в скважинах 2, 5, 9 и 10 имеют место максимальные значения динамического модуля сдвига до 650 МПа, что превышает практически вдвое значения, характерные для водонасыщенного песка в естественном залегании.

II.Межскважинные просвечивания Под глубинами прокладки коллектора располагается на всем протяжении его заложения зона грунтов с пониженными значениями скоростей распространения упругих продольных волн, ниже значений в 1600м/с на фоне более высоких значений скорости, что свидетельствует о понижении деформационных характеристик и разуплотнении этой области водонасыщенных песков.

Раздел 3. Контроль качества заполнения тоннеля Введение В настоящем отчёте приводятся результаты инженерно-геофизических работ, выполненных на объекте: ««Гостиница в составе многофункционального комплекса на площади Курского вокзала» по адресу г. Москва. ЦАО, внутригородское муниципальное образование Басманное, площадь Курского вокзала». Цель работы состояла в получении и анализе записей волнового поля от электроискрового источника в водонаполненной скважине, обсаженной полиэтиленовой трубой и пересекающей массив природных карбонатных отложений, в которых был уложен тоннель метро, подлежащий заполнению цементным раствором для повышения несущей способности массива грунтов в целом. Для достижения данных целей был использован комплекс геофизических методов, включающий в себя сейсмоакустический каротаж и межскважинное сейсмоакустическое просвечивание. Виды и объёмы геофизических работ составлены в соответствии с техническим заданием производителей работ по заполнению полости и действующими нормативными актами. Работы выполнялись в два временных промежутка: до и после производства тампонажных работ по заполнению пустот. До производства тампонажных работ полевые исследования проводились в паре скважин 14-5. Основной объём геофизических исследований выполнялся после производства тампонажных работ, по мере подготовки скважин и окончания закачек раствора. Полный объём фактически выполненных геофизических работ приведён в Таблице 1. Раздел 3.1. Методика проведения геофизических работ Сейсмоакустический каротаж был проведен в 17 скважинах с использованием 1-канальной станции в двух вариантах: 1) потенциальный каротаж: наблюдения с неподвижным источником, шаг наблюдения 10 см., в среднем 10 ф.н./скв. 2) дифференциальный каротаж: наблюдения с равномерно двигающимся источником с шагом наблюдения 10 см., в среднем по 30 ф.н. на скважину, общее число наблюдений составило 680 ф.н. Сейсмокустическое томографическое просвечивание было выполнено между 13 парами скважин, пробуренных на дневной поверхности, с регистрацией продольных волн. Использовалась 3-х канальная станция. Расстояние между сейсмоприемниками 1 м. Число просвечиваний для разных пар скважин приведено в таблице 3.1. Раздел 3.2. Аппаратура Электроискровой источник упругих волн (ЭДИВ-1), разработанный на кафедре сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, включает в себя емкостной накопитель электрической энергии, высоковольтный ключ, блок

синхронизации, энергомагистраль, выполненную на коаксиальном кабеле, и, собственно, излучатель. При проведении сейсмоакустических исследований величина накопленной энергии изменялась в соответствии с физико-геологическими условиями и составляла от 0.7 до 5 кДж при напряжении 6 кВ. Накопительная часть и блок управления энергоустановкой ЭДИВ-1 располагается на поверхности земли (помещение, транспортное средство). В состав ЭДИВ-1 входят: блок зарядного устройства (ЗУ), преобразующий переменное напряжение 220В в постоянное напряжение 6000В, блок конденсаторов с тиристорным ключом (БКТ), формирующий электрический разряд в воде (базовая комплектация). Дополнительно к базовой комплектации ЭДИВ-1 может комплектоваться одним или двумя блоками конденсаторов без тиристорного ключа (БК), увеличивающими энергию разряда на 1-2кДж. Блоки ЭДИВ-1 защищены от механических и климатических воздействий и рассчитаны на функционирование в диапазоне температур от + 40ºС до минус 5ºС и относительной влажности до 95% при температуре 25ºС. Питание ЭДИВ-1 осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 190-240В. Мощность, потребляемая ЭДИВ-1 от сети не более 2500ВА. Режим работы ЭДИВ-1 длительный - не менее 8 часов непрерывной работы. Габаритные размеры блоков ЭДИВ-1 (высота × ширина × глубина) - 420×400×140 мм. Масса источника ЭДИВ-1 (базовая комплектация – ЗУ + БКТ) – 24кг Максимальное напряжение заряда конденсаторной батареи БКТ и БК – 4800В. Внешний вид блока электроискрового возбуждения ЭДИВ представлен на Рис. 1.1. Рис. 3.2.1. Блок электроискрового возбуждения упругих волн ЭДИВ-1. Слева коммутатор сильных токов; справа – блок управления процессом заряда и разряда. Скважинный излучатель – преобразователь электрической энергии в энергию упругой волны (спаркер). Представляет собой размещенный на конце коаксиального кабеля – токоведущей магитрали – отрезок прорезиненного шланга, в котором размещены разрядные электроды, заполненного электролитом – раствором NaCl (поваренной соли). Внешний вид спаркера представлен на 3.2.1.

В качестве приемника колебаний используется трехканальная пьезокоса, выполненная на основе пьезодатчиков ПДС-21, с установленным на каждый канал дифференциальным предусилителем. Предусилитель, расположенный в непосредственной близости от датчиков, а также сплошное экранирование приемных элементов и сигнальных проводов приводит к низкому уровню наведенных помех и высокому соотношению сигнал/шум. Пьезоэлектрические преобразователи, используемые в пьезокосе, обеспечивают полосу пропускания до 5000 Гц. Необходимо отметить, что в лучших современных конструкциях прижимных приемников смещения не удается обеспечить полосу пропускания выше 1000-1500 Гц, в то же время установлено, что частота продольной волны при каротажных исследованиях с электроискровым источником может достигать 2000 Гц. Пьезоприемник давления сейсмический ПДС-21 предназначен для регистрации сейсмических волн (динамического давления) в диапазоне частот 5 - 6000 Гц при проведении морских и скважинных сейсмических исследований. Пьезоприемник входит в комплект многоканальных приемных устройств для морской и скважинной сейсморазведки. Внешний вид приемной косы представлен на 1.3. Технические характеристики пьезоприемника приведены в таблице 2. Система сбора – аналого-цифровой преобразователь E14-440.

АЦП (аналого-цифровой преобразователь) является основой системы

сбора цифровых данных. Внешний вид АЦП приведен на Рис. 3.2.4. Раздел 3.3. Методика полевых наблюдений при сейсмоакустическом каротаже Подробно техника и методика проведения каротажа (вертикального сейсмического профилирования) изложена в [Гальперин, 1982; Электроискровой источник для целей наземной сейсморазведки,1989, Применение..., 1992]. Пример сейсмограммы, полученной при сейсмоакустическом каротаже в скважине при размещении источника на фиксированной глубине и перемещающемся приемнике представлен на рисунке 3.3.1.

Раздел 3.4. Обработка полевых данных каротажа Определение скоростей: определение пластовых скоростей по данным сейсмоакустических исследований осуществляется с помощью ряда приемов. Первый этап заключался в прослеживании на сейсмограммах первых и последующих вступлений продольных волн, а также в построении по снятым с сейсмограмм временам продольных вертикальных годографов. Пикировки волн проводятся по записям, полученным методом отклонений с зачернением положительных амплитуд. Далее годографы подвергаются продифференцию с целью получения интервальных скоростей. В результате проведения сейсмоакустических исследований были получены и проинтерпретированы кривые скоростей продольных волн, а также с помощью корреляционной зависимости рассчитаны графики значений предела прочности на одноосное сжатие вдоль стволов скважин Раздел 3.5. Методика межскважинного сейсмоакустического просвечивания Просвечивание между скважинами осуществляется по схеме «для каждой точки возбуждения – все точки приема». Пример лучевой схемы просвечиваний приведен на рис.3.5.1. При постановке задачи об изучении скоростного разреза продольных волн и в качестве начального приближения модели разреза используется кривая зависимости средней скорости пробега по лучу от источника к приемнику при размещении источника и приемника на одинаковых глубинах в двух скважинах – так называемое параллельное просвечивание, а также данные о скоростях по каротажам. Такая картина позволяет по временам прихода волн – на рисунке помечены зелёной линией - определить скорости распространения продольных волн в массиве в горизонтальном направлении на базе, соответствующей расстоянию между скважинами и на этом основании составить начальную модель для томографического обращения. По результатам сейсмоакустических просвечиваний (рис.3.5.2.) выполняются томографические обращения, позволяющие получать разрезы в изолиниях скоростей распространений продольных волн.

Красной линией показаны времена первых вступлений продольных волн.

Раздел 3.6. Результаты сейсмоакустических исследований в скважинах Сейсмоакустический каротаж проводился в 17 скважинах с номерами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 18, 19, 20, 22, 23. В результате были получены графики изменения скоростей распространения продольных волн вдоль стволов соответствующих скважин. На рисунке 2.1 представлены кривые — графики значений скорости продольных волн для каждой из скважин, где проводился сейсмоакустический каротаж. В разрезе с увеличением глубины скорости меняются в 1.5-1.7 раз от значений ниже 1500 м/с до значений 2400 м/с и более. Стоит отметить, что скорости распространения продольных волн при скважинных исследованиях ниже, чем при межскважинных просвечиваниях: это обусловлено разрушением околоскважинного пространства при бурении. Информация о распределении скоростей в

скважинах использовалась для построения начальных моделей для проведения томографического обращения. На рисунке 3.6.1 представлены кривые — графики значений предела прочности на одноосное сжатие (Rc, МПа) для каждой из скважин, где проводился сейсмоакустический каротаж. Каротажные кривые были пересчитаны в кривые значений предела прочности на одноосное сжатие по корреляционной зависимости Горяинова [4]: Rc = □0.6*10□^(0.255*v_p+1.708) Важно отметить, что использованная при расчёте Rc формула была получена для известняков, поэтому абсолютные значения предела прочности для исследуемых грунтов могут отличаться. При отборе грунтовых проб непосредственно на исследуемой площадке и определении Rc открывается возможность произвести пересчёт скоростей в кривые значений предела прочности на одноосное сжатие по корреляционной зависимости Л.В. Шаумян из работы Горяинова [4], которая уточняется значениями максимальных в исследуемом массиве значений скорости продольных волн и предела прочности. Раздел 3.7. Результаты межскважинного сейсмоакустического просвечивания Результаты межскважинного сейсмоакустического просвечивания до производства тампонажных работ

Результат томографического обращения для межскважинного пространства между скважинами №5 и №14 приведен на рисунке 3.7.1. Изолинии значений скорости распространения продольных упругих волн были пересчитаны в изолинии значений предела прочности на одноосное сжатие по корреляционной зависимости Горяинова [2,4] (Rc = □0.6*10□^(0.255*v_p+1.708)). Результат пересчета значений скорости продольных волн в предел прочности материала межскважинного пространства приведен на рис. 3.7.2.

Обсуждение результатов сейсмоакустических исследований работ и заключение до производства тампонажных работ. На рисунках 3.7.3 а) и б) приведены данные сейсмоакустического каротажа в скважинах №5 и №14, наложенные на разрез. Каротажные наблюдения выше 6 и 5 метров по глубине от пола не проводились ввиду отсутствия воды в грунте. С глубины в 8 метров картина резко улучшается. Это, по всей видимости, связано с началом уровня грунтовых вод и, хотя обсадная труба в скважине была заполнена до горловины, не было хорошего контакта обсадки с окружающей породой. По значениям скоростей распространения продольных волн в разрезе два высокоскоростных слоя в интервалах 14-16 м и 24.5 - 26.5 м, в которых скорости в полтора раза выше, чем в окружающем пространстве. Верхняя зона повышенных скоростей может быть связана с более прочными слоями известняка, а нижняя зона повышенной скорости очевидно связана с присутствием бетонной обделки тоннеля. Соответственно, это можно увидеть и на каротажных графиках предела прочности на одноосное сжатие. Зона пониженных скоростей ниже 27 метров можно связать с акустически мягким заполнением верхней части тоннеля. На рисунке 3.7.4 представлен монтаж всех результатов сейсмоакустических каротажей и межскважинного просвечивания с разрезами скважин и чертежами сооружения. Таким образом, по результатам данного просвечивания до производства тампонажных работ можно сделать следующие выводы: 1.Верхняя часть тоннеля заполнена жидкой грязью. 2.Наиболее разрушенная и ослабленная часть известняков относится к интервалу глубин 18-23 м. 3.В разрезе межскважинного пространства выделяются две существенно различные по упругим и прочностным характеристикам области, разделенные оболочкой (тюбингом) тоннеля – верхняя толща, сложенная переслаиванием глин и трещи-

новатых известняков и область внутри тоннеля. 4. Верхняя толща характеризуется значениями скоростей продольных волн в интервале 2000м/с – 3000 м/с и пределами прочности на одноосное сжатие 18 – 32 МПа. Наименее прочные, трещиноватые интервалы в известняках подтверждаются большим поглощением бурового раствора при бурении. 5. Область внутри тоннеля до производства тампонажных работ характеризуется значениями скоростей продольных волн менее 1700 м/с и пределами прочности на одноосное сжатие менее 12-10 МПа 6.Область оболочки тоннеля (тюбинга) при межскважинном просвечивании характеризуется маломощной зоной повышенных значений скорости распространения продольных волн до 3500 м/с и пределом прочности до 48 МПа. 7.В качестве подготовки к анализу результатов сейсмоакустических межскважинных просвечиваний, произведенных после тампонажных работ, необходимо определить количественные характеристики нормального состояния элементов массива грунтов и аномально разуплотненных, либо не затампонированных областей. То есть, области массива грунтов со значениями скорости распространения продольных волн менее 1700 м/с и пределами прочности на одноосное сжатие менее 12-10 МПа будут характеризоваться как «субстанция с прочностью до 12 МПа» и выделяться на разрезах.

Результаты межскважинного сейсмоакустического просвечивания В подразделе приведены результаты сейсмоакустического (томографического) обращения по данным межскважинных просвечиваний для 12 пар скважин в виде разрезов в изолиниях скорости распространения продольных волн и разрезов в изолиниях значений предела прочности на одноосное сжатие, рассчитанных по корреляционной зависимости. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 9-11 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 9 и 11 представлен на рис. 3.7.5, на рис. 3.2.2. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 9-11: 1. В межскважинном пространстве между скв. 9 и скв. 11 от поверхности до глубин в 10 метров наблюдается сильно разуплотненная среда со значениями скоростей продольных волн близких в среднем к 1500 м/с – то есть, к значениям характерным для водонасыщенной среды или слабого суглинка. Это же подтверждается низкими значениями скоростей распространения волн по данным каротажей скважин. 2. В массиве, начиная с глубины 10 м до кровли тоннеля (на глубине 27 м), среднее значение скорости распространения продольных волн в интервале скважин 9 – 11 составляет 2200 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 25 МПа. 3. В заполненной части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн в интервале скважин 9 – 11 составляет в среднем 2200 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 25 МПа. 4. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства. Рис. 3.7.6. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 9 и 11. Разрез в изолиниях значений предела прочности. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 11-15 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 11 и 15 представлен на рис. 3.7.7, на рис. 3.7.8. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Рис. 3.7.7. Ре-

зультат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 11 и 15. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 11-15: 1. В массиве, начиная с глубины 10 м и до кровли тоннеля (на глубине 27 м) среднее значение скорости распространения продольных волн в интервале скважин 11 – 15 составляет 2500 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 30 МПа. 2. В заполненной части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн в интервале скважин 11 – 15 составляет в среднем 3300 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 40 МПа. 3. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства. Рис. 3.7.8. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 11 и 15. Разрез в изолиниях значений предела прочности.

Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 15-20 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 15 и 20 представлен на рис. 3.7.9, на рис. 3.7.10. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Рис. 3.7.. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 15 и 20. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 15-20: 1. В заполненной части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн составляет 2500 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 30 МПа. 2. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства.

Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 20-22 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 20 и 22 представлен на рис. 3.7.11, на рис. 3.7.12. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 20-22: 1. На разрезе в теле тоннеля выделяется область с относительно пониженными значениями скорости продольных волн со значениями 1800 -1900 м/с. Это соответствует пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 20 МПа. 2. В остальной части тела тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн составляет 2500 м/с и более, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 30 МПа и более. 3. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства со средним значением предела прочности заполняющего материала на одноосное сжатие 28 МПа. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 4-10 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 4 и 10 представлен на рис. 3.7.13, на рис. 3.7.14. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности.

Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 4-10: 1. В заполненной части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн составляет 3300 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 35-40 МПа. 2. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства.

Рис. 3.7.14. Результат межскважинного сейсмического просвечивания

для пары скважин 4 и 10. Разрез в изолиниях значений предела прочности. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 13-23 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 13 и 23 представлен на рис. 3.7.15, на рис. 3.7.16 приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 10-23: 1. На рисунке 3.2.11 можно выделить область пониженных значений скорости распространения продольных волн (меньше 1.7 км/с), расположенную выше кровли тоннеля. Она имеет значения скорости до 1.3 км/с и глубину до 22 метров в окрестности скважины 23, где предел прочности на одноосное сжатие может быть менее 10 МПа. 2. В заполненной части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн в интервале скважин 23-13 составляет в среднем 3000 – 3200 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 30-35 МПа. 3. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства внутри тоннеля.

Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 13-5 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 13 и 5 представлен на рис. 3.7.17, на рис. 3.7.18. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности.

Рис. 3.7.17. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 13 и 5. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 13-5: 1. Заполнение бетоном полости в тоннеле между скважинами 5 и 13 практически равномерное со значениями скорости продольных волн 2900-3100 м/с, что соответствует прочности на одноосное сжатие в 30 МПа. 2. В нижней части около скважины 13 выделяется небольшая область (рис.3.2.13, интервал 0 – 4 м,) относительно пониженных значений скорости продольных волн до 2000-2100 м\с, что соответствует, примерно, прочности на одноосное сжатие в 25 МПа. 3. Сравнение распределения скоростей распространения волн в окрестности скважины 5 до заполнения полости в тоннеле цементом и после показало, что в результате заполнения значения скоростей распространения продольных волн давления выросли в полтора раза, что соответствует возрастанию предела прочности материала, заполняющего тоннель до современных значений в 30 МПа (и более). 4. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства с минимальным пределом прочности в 25 МПа в области вблизи забоя сква.13. Рис. 3.7.18. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 13 и 5. Разрез в изолиниях значений предела прочности. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 23-18 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 23 и 18 представлен на рис. 3.7.19, на рис. 3.7.20 приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Рис. 3.7.19. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 23 и 18. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 23-18: 1. На рисунке 3.2.15 можно выделить область пониженных значений скорости распространения продольных волн (меньше 1.7 км/с). Она расположены выше кровли тоннеля и имеет наименьшие значения скорости и глубину до 22 метров в окрестности скважины 23, где предел прочности на одноосное сжатие может быть

менее 10 МПа. 2. В области тоннеля по глубинам 23-30 метров расположена область максимальных значений скорости более 3000 м/с, что соответствует пределу прочности на одноосное сжатие более 30 МПа. 3. В заполненной части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн в интервале скважин 23-18 составляет в среднем 2500м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 20-25 МПа. 4. Следует обратить внимание на заполнение пространства выше уровня тоннеля по скважине 23. 5. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства внутри тоннеля. Рис. 3.7.20. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 23 и 18. Разрез в изолиниях значений предела прочности. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 18-19 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 18 и 19 представлен на рис. 3.7.21, на рис. 3.7.22 приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 18-19: 1. Пониженные значения скорости распространения продольных волн в скважине 19 в сравнении со значениями для скважины 18 могут быть объяснены ослаблением приствольной зоны при бурении. Это учтено при обработке и не повлияло на результат томографии в межскважинном пространстве. 2. В заполненной бетоном части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн составляет 3200 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие до 40 МПа. Заполнение вдоль участка тоннеля равномерное. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 1-8 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 1 и 8 представлен на рис. 3.7.23, на рис. 3.7.23. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 1-8: 1. В заполненной части тоннеля среднее значение скорости распространения продольных волн составляет 3300 м/с, что соответствует среднему пределу прочности материала заполнителя на одноосное сжатие в 35-40 МПа. 2. В верхней части разреза в области глубин в 9-10 м, ближе к скважине 8 в интервале 13-15 м расположена полость, размером примерно 2х2 метра в разрезе не заполненная цементным раствором. 3. Результаты геофизических работ подтверждают в целом сплошность заполненного пространства. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 3-6 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 3 и 6 представлен на рис. 3.2.24, на рис. 3.2.25. приведен разрез в изолиниях значений предела прочности. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 3-6: 1. Заполнение бетоном полости в тоннеле между скважинами 3 и 6 практически равномерное со значениями скорости продольных волн 2500-3500 м/с, что соответствует, примерно, прочности на одноосное сжатие в 25 -40 МПа. 2. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства. Межскважинное сейсмическое просвечивание: скважины 6-2 Разрез в изолиниях значений скорости распространения продольных волн в межскважинном пространстве между скважинами 6 и 2 представлен на рис. 3.2.26, на рис. 3.2.27 приведен разрез в изолиниях значений предела прочности.

Рис. 3.7.26. Результат межскважинного сейсмического просвечивания для пары скважин 6 и 2. Заключения по результатам интерпретации для пары скважин 6-2: 1. Заполнение бетоном полости в тоннеле между скважинами 6 и 2 практически равномерное со значениями скорости продольных волн 2500-3200 м/с, что соответствует, примерно, прочности на одноосное сжатие в 25 -35 МПа. 2. Результаты геофизических работ подтверждают сплошность заполненного пространства. Трехмерная томографическая инверсия Результаты сейсмоакустического (томографического) обращения по данным межскважинных просвечиваний для всех 12 пар скважин в разных проекциях представлены на рис. 3.7.28, 3.7.29, 3.7.30. В соответствии с диагностическими признаками, выявленными в ходе сравнения результатов томографической инверсии до и после производства тампонажных работ на парах скважин 13-5 и 14-5, были выделены 8 зон с пониженными упругими (скорость меньше 1.7 км/с) и прочностными (Rc <14 МПа) характеристиками, вероятно, связанных с разуплотнением грунтов. Они обладают пониженными упругими и прочностными характеристиками, соответствующими по свойствам незаполненной полости в интервале туннеля до производства тампонажных работ. Красными кружками на скважинах отмечены кровля тоннеля на глубине 27 м. Линиями между скважинами отмечены межскважинные просвечивания. Заключение 1. Результаты сейсмоакустического исследования скважин, включающего в себя два вида каротажей и межскважинные просвечивания с последующим томографическим обращением, позволили определить пространственных границы пустот и полостей в забутовке вспомогательных подземных выработок метрополитена в основании строящейся «Гостиницы в составе многофункционального комплекса на площади Курского вокзала». Интервал обследования определялся доступностью ствола скважины для приборов в момент исследования. 2. Имеющиеся в литературе и используемые в практике корреляционные связи между упругими характеристиками грунтов и их прочностными свойствами дали возможность произвести оценки прочностных свойств исследуемых грунтов. 3. В толще исследованных грунтов после производства тампонажных работ по данным сейсмоакустических исследований выделяется ряд областей со значениями скорости распространения продольных волн менее 1700 м/с и значениями предела прочности на одноосное сжатие менее 14 МПа (такими характеристиками по результатам геофизических исследований обладали грунты ниже кровли тоннеля до производства тампонажа). Глубины центров всех областей с пониженной прочностью лежат в пределах от 15 до 5 м, т.е. выше кровли тоннеля. 4. Таким образом в ходе геофизических исследований скважин в забученных сооружениях метрополитена под пятном застройки строящегося МФК пустот не обнаружено. Раздел 4. Наземные сейсмические исследования. Введение Целями геофизических изысканий являлось: Определение упругих свойств грунтов верхней части разреза Выявление зон разуплотнения, просадок и иных аномальных участков, наличие которых может негативно сказаться на возводимом объекте Определение фактического уровня грунтовых вод Установление фактического местоположения коллектора в грунтовом массиве. Для решения данной цели был использован комплекс геофизических методов, включающий в себя наземную сейсморазведку в модификации сейсмотомографии на продольном типе волн и сейсморазведку методом отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ ОГТ) на поперечном типе волн. В

последующих разделах приводится подробная информация о выполненных полевых работах с примерами полученных полевых записей, а также подробно приводятся результаты обработки геофизических данных. Полный объём фактически выполненных геофизических работ приведён в Таблице 4.1. Раздел 4.1. Методика проведения сейсморазведочных работ Сейсморазведочные работы проводились методом отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ ОГТ) на поперечном типе волн, а также методом сейсмотомографии на продольном типе волн. В общей сложности было выполнено шесть сейсморазведочных профиля по 46 метров каждый. При измерениях на обоих типах волн шаг между пунктами приёма (ПП) и пунктами возбуждения (ПВ) составлял по 2 метра. Кроме того, с каждой стороны от сейсмической расстановки выполнялось по три выноса длиной от 4 до 16-ти метров. В общей сложности 30 ф.н. на расстановку для каждого типа волн. Схема наблюдений приведена на рисунке 1.1.1.

Регистрация продольных волн выполнялась по схеме Z-Z. Возбуждение сейсмического сигнала обеспечивалось ударом кувалды массой 5 кг по металлической пластине, которая укладывается горизонтально относительно поверхности земли. Регистрация поперечных SH-волн выполнялась по схеме Y-Y. Удар наносился горизонтально с применением методики «правых» и «левых» ударов. При использовании данной методики удары кувалдой на одном ПВ производятся в направлении, перпендикулярном к линии профиля, в одну и другую сторону. В данном случае мы регистрируем оба типа волн, причём зарегистрированная P-волна является помехой, которую удаётся ослабить в результате вычитания «левых» и «правых» ударов. При реализации данной методики мы получаем два типа сейсмограмм: одна группа сейсмограмм получена при возбуждении «левыми» ударами, а другая - «правыми». На полученных сейсмограммах ОПВ S-волны находятся в противофазе, что при последующем вычитании усиливает амплитуды зарегистрированных S-волн относительно амплитуды P-волн, которые вычитаются синфазно. Для улучшения соотношения «полезный сигнал»/«помеха» на каждом пункте возбуждения осуществлялось от 8 до 25 повторных ударов (накоплений сигнала). При регистрации сейсмического сигнала в процессе его накопления использовались методические приемы, обеспечивающие максимальную синхронность суммирования. Регистрация наземных сейсмических данных осуществлялась на 24-х канальную сейсмостанцию «Лакколит 24-М3» (рис. 1.1.4) производства ООО «ЛОГИС». Станция предназначена для производства сейсморазведочных работ методами преломленных и отраженных волн при проведении геолого-геофизических исследований. Станция состоит из блока регистратора ”Лакколит 24-М3” и персонального компьютера «ноутбук». Основные технические характеристики сейсморазведочной станции “Лакколит 24-М3” приведены в таблице 4.1.1. В комплект блока ”Лакколит 24-М3” входит источник питания 12 В и зарядное устройство. Компьютер обеспечивает управление блоками, последующую обработку информации, отображение результатов и подключается к сети через Ethernet-адаптер. Скорость обмена по локальной сети - 10 Мбит/сек. Передача информации по локальной сети может осуществляться через радио-Ethernet, что обеспечивает возможность дистанционного управления устройствами сети в радиусе до 100 м и позволяет оператору находиться в защищенном от внешних климатических условий месте. Обслуживание сейсмостанции производится одним оператором. Конструкция

модулей обеспечивает ее надежную эксплуатацию в жестких условиях и в широком диапазоне температур. Также в комплект сейсмостанции входит программное обеспечение сбора и хранения сейсмической информации. Это программное обеспечение позволяет: - выбрать частоту дискретизации, - в полуавтоматическом режиме подобрать коэффициенты усиления, - производить запуск станции от внешнего источника – сейсмоприёмника, - просматривать единичные и накопленные трассы на экране компьютера, - менять поканально усиление трасс на сейсмограмме, - управлять процессом накопления, то есть складывать единичные трассы или отбрасывать их по решению оператора, записывать единичные и (или) накопленные сейсмограммы в заданные оператором трассы. Приём колебаний осуществлялся с помощью вертикальных и горизонтальных электродинамических сейсмоприемников GS-20DX (рис. 1.1.5), соединенных с сейсмостанцией сейсмической косой (длинной проводной линией) с контактами для подключения сейсмоприёмников. Сейсмоприёмники GS-20DX производства предприятия OYO-GEO ImpulseInternational обладают частотной характеристикой с собственной частотой 10 Гц, которая обеспечивает равномерность в полосе частот 10-500 Гц (рис. 1.1.6). Поступивший в систему сбора сигнал с сейсмоприёмника подвергается аналогово-цифровому преобразованию и в дискретном виде записывается в память компьютера, в соответствующий файл. При этом времена на сейсмических записях отсчитываются от момента срабатывания датчика-сейсмоприёмника во время удара кувалды. Поступивший в систему сбора сигнал с сейсмоприёмника подвергается аналогово-цифровому преобразованию и в дискретном виде записывается в память компьютера, в соответствующий файл. При этом времена на сейсмических записях отсчитываются от момента срабатывания датчика-сейсмоприёмника во время удара кувалды. Контроль качества полевого сейсмического материала осуществлялся геофизиком-оператором во время ведения работ. При работе оператора сейсмостанции контроль качества включает в себя: - просмотр и анализ полевых сейсмограмм; - просмотр полевых тестов в цифровом виде; - составление рапортов операторов; - анализ взаимных положений ПВ и ПП; - регистрацию полученного за день материала и подготовку его к передаче для обработки на ВЦ. В случае наличия на записи помех, затрудняющих выделение полезного сигнала и решения поставленных геологических задач, физическое наблюдение переотрабатывалось. Раздел 4.2. Обработка сейсморазведочных данных Первичная обработка Первичная обработка результатов сейсмических наблюдений проводилась с помощью системы RadExPro, разработанной геофизической компанией «Deko-Геофизика». Система предназначена для обработки и интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки на базе отраженных, преломленных и рефрагированных волн. Основными функциональными частями системы являются интерактивная многооконная среда, база данных, набор модулей собственно обработки и средства обработки систем годографов. Обработка сейсмограмм осуществляется путем составления потоков из модулей. База данных содержит всю исходную, промежуточную и результативную информацию – исходные данные, обработанные данные, историю обработки с параметрами процедур, все виды пикировок и т.п. Ввод/вывод ориентирован на стандартный набор периферийных устройств – жесткий диск, гибкие диски, принтер/плоттер. Оболочка системы (среда), в которой работает пользователь, предоставляет следующие возможности: выбор

обрабатывающих модулей и формирование потока обработки; выбор исходных данных и сохранение промежуточных результатов; задание параметров каждого модуля; запуск потока обработки. Работа происходит в нескольких окнах, соответствующих вышеприведенному списку функций оболочки. Интерфейс пользователя - графический, с помощью мыши и/или клавиатуры. Предварительная обработка данных по методам сейсмотомографии включает в себя: 1. Предварительную редакцию трасс на сейсмограммах ОПВ. 2. Ввод геометрии расстановки в исходные данные; 3. Суммирование реализаций с одного пункта возбуждения с целью подавления случайной помехи (рис 4.2.1, 4.2.2);

Обработка сейсморазведочных данных методом МОВ ОГТ Сейсмограммы поперечного типа волн обрабатывались методом отражённых волн. Приблизительный граф обработки МОВ ОГТ приведён в таблице 1.2.1. Ниже приводится краткое описание используемых процедур Бинирование профиля по ОГТ - в результате, в пробинированном наборе данных заполняются заголовки трасс, номер точки ОГТ, координаты точки ОГТ. Рассчитываются удаления источник – приёмник и кратность для данной точки. Полосовая фильтрация. Данная процедура применяет частотную фильтрацию к каждой входной трассе. Алгоритм фильтрации действует в частотной области. Перед применением полосовой фильтрации анализируется АЧХ входных данных. Определяются частотные характеристики полезного сигнала и частота микросейсм. По результатам анализа определяется поле значений фильтра. На исследуемом объекте частота полезного сигнала изменяется в достаточно широком пределе, но в целом приблизительно находится в полосе от 20 до 40 Гц. Помехи же представлены высокочастотными и низкочастотными микросейсмами различного происхождения. Низкочастотные преимущественно связаны с автомобильным транспортом, высокочастотные – ветровыми помехами. Пример использования фильтрации приведён на рис. 4.2.3. Как видно на рисунке 4.2.2, использовался достаточно мягкий фильтр, который минимально изменил спектр сигнала. Балансировка амплитуд - для приведения сейсмической трассы к стационарному виду, когда средний уровень ее интенсивности не изменяется во времени, и сжатия динамического диапазона к сейсмическим записям была применена регулировка амплитуд (модуль Amplitude Correction) (рис 4.2.4). Вводятся поправки за затухание волны и за сферическое расхождение. Определение скоростного закона Модуль Interactive Velocity Analysis используется для интерактивного анализа скоростей суммирования ОГТ. По этим суммам рассчитывается спектр скоростей в указанном диапазоне изменения скорости и отображается графически. Далее пикируются значение скорости вдоль выбранного горизонта на основе спектра скоростей, анализируя при этом изменения во внешнем виде стека, рассчитанного на основе текущего скоростного закона и изменения во внешнем виде сейсмограмм, в которые введены кинематические поправки также на основе текущего скоростного закона. Пример подбора скоростей представлен на рисунке 4.2.5. Построение временного разреза. Процедура выполняется с использованием двух модулей: NMO/NMI, который позволяет, используя функцию скорости, рассчитать и ввести кинематические поправки в отсчеты трасс ОГТ путем линейной интерполяции, и Ensemble Stack, который производит непосредственно суммирование трасс. Во время суммирования выставлялось ограничение по удалениям (максимальный OFFSET), которое составляло 20-30

метров. Временной разрез приведён на рис. 4.2.6. Построение глубинного разреза. После получения окончательного временного разреза проводится процедура преобразования в глубинный разрез с помощью модуля Time/Depth Conversion. Минимальный размер объектов (слоёв, полостей и т.д), выделяемых по данным сейсморазведки МОВ ОГТ, определяется вертикальной разрешающей способностью метода, которую принято рассчитывать по условию Вайдса как 1/4-1/8 длины волны. Помимо длины волны на разрешающую способность также влияют такие факторы как уровень помех, контрастность геологических границ, форма сигнала и используемые приёмы обработки данных. Учитывая все эти факторы, можно сказать, что реальная вертикальная разрешонность МОВ ОГТ на полученных разрезах составляет порядка 2-3 метров. Обработка сейсморазведочных данных методом сейсмотомографии При обработке сейсмограмм продольного типа волн на следующем этапе проводилось пикирование первых вступлений. На рис. 4.2.7, 4.2.8 приведены примеры волновых картин с пикировками первых вступлений. Полученные пикировки при помощи модуля EasyRefraction экспортируются в формат .st для дальнейшего использования в программе ZONDST2D». Пример поля годографов приведён на рисунке 4.2.9. Решение прямой и обратной задачи сейсмотомографии производилось в программном комплексе «ZONDST2D». Эта программа предназначена для двухмерной обработки профильных данных сейсмотомографии и МПВ и позволяет максимально эффективно решить поставленную геологическую задачу. При решении прямой задачи трассировки лучей используется специальный алгоритм теории графов (Shortestpath’smethod). Данный алгоритм характеризуется высокой скоростью расчётов и контролируемой точностью. При моделировании поля времён среда среда разбивается сетью прямоугольных ячеек с постоянным значением скорости. Для решения обратной задачи (инверсии) используется метод Ньютона с регуляризацией. Регуляризация повышает устойчивость решения и позволяет получить более гладкое распределение скоростей в среде. Итоговый разрез представляет собой двухмерное скоростное поле. Помимо основного модуля инверсии, был использован модуль слоистой инверсии, при котором среда также разбита на ячейки, но в слоистом представлении. Результатом такой обработки является скоростной разрез, разбитый на некоторое количество слоёв, разделённых наиболее выраженными преломляющими границами. Таким образом данный модуль является модификацией метода преломлённых волн (МПВ). По отношению к методу Т0 используемый метод обработки имеет ряд преимущество, в частности нет ограничения на кривизну границы. Рабочее окно модуля приведено на рис. 4.2.11. Раздел 4.3. Интерпретация данных сейсморазведки По результатам обработки данных сейсморазведки были построены скоростные разрезы продольного типа волн и глубинные разрезы ОГТ поперечного типа волн. Сейсмограммы продольного типа волн были обработаны двумя методами: методом преломлённых волн и методом наземной сейсмотомографии. Глубинность полученных скоростных разрезов составила около 10-12 метров. По результатам обработки методом преломлённых волн среда может быть представлена двухслойной моделью. Скорость продольных волн в верхнем слое, представленном насыпными грунтами и, отчасти, глинами, составляет преимущественно 150-350 м/с. В нижнем слое, представленном глинами, суглинками и песками, залегающими ниже уровня грунтовых вод, 1200-1700 м/с. Единственная выделенная преломляющая

граница соответствует непосредственно уровню грунтовых вод. В целом граница залегает на отметках -0.6 - -1.2 метра, небольшие несоответствия в положении УГВ с данными бурения не превышают 0.2-0.4 метров и могут быть связаны с временными колебаниями уровня грунтовых вод в связи с изменением количества атмосферных осадков и других факторов. На профиле №1 (ПК 2-16), выполненном вблизи от колодца 37, и на профилях №5 и 6, выполненных вблизи колодца 36, наблюдается небольшое погружение УГВ до отметок -2 - -2.5 метров, что может быть следствием дренирования грунтовых вод в колодцы. Естественно, в перспективе подобные процессы могут привести к возникновению техногенной суффозии и просадкам в самом верхнем слое грунтов значительно выше самого коллектора. Результаты сейсмотомографической обработки в целом дублируют результаты обработки МПВ. Среда также представлена двухслойно моделью, в верхнем слое скорости меняются в диапазоне от 150 до 500 м/с, во втором слое плавно увеличивается от 800 до 1800-2000 м/с. Граница между этими слоями соответствует уровню грунтовых вод и практически полностью повторяет преломляющую границу, полученную по данным МПВ. С учётом градиента скоростей и положению преломляющей границы МПВ, границу кровли УГВ было решено проводить по изолиниям 700-800 м/с. Скоростные разрезы с выделенной кровлей водонасыщенных песков приведены на рисунках 4.3.4-4.3.15, карта изогипс УГВ на рисунке 4.3.1.

Рис.4.3.1. Карта изогипс кровли уровня грунтовых вод.

Сейсмограммы поперечного типа волн обрабатывались методом отражённых волн в модификации общей глубинной точки. Основной решаемой задачей для данного метода являлось определение фактического положения коллектора, который на полученных разрезах выделяется по характерным гиперболам дифракции (на разрезах обведены голубым цветом). Верхняя кромка коллектора по данным ОГТ залегает на отметках от -5.6 м., которые наблюдаются на сейсморазведочном профиле №5 возле колодца №37 и довольно близки к проектным значениям, до отметок -8.3 в центральной части обследуемого участка. Фактическое положение коллектора приведено на рисунке 1.3.2. Анализируя полученный результат можно сказать, что наблюдается значительное «провисание» коллектора в центральной части обследуемого участка. В целом разрез малоконтрастен по скоростям поперечных волн, что затрудняет надёжное литологическое расчленение по глубинным разрезам ОГТ. Преимущественно скорости Vs меняются в пределах от 100 до 140 м/с, что является крайне низкими, не типичными для данного типа грунтов, скоростям и может характеризовать их как ослабленные. И, хотя задача литологического расчленения перед сейсморазведкой не стояла (в этом плане гораздо полные и точные данные были получены по данным гамма- и акустического каротажей), отдельные оси синфазности, увязанные с геологическими границами на разрезах выделяются. Всего выделено две границы: Кровля суглинка серого, лёгкого, текучепластичного с прослоями песка и включениями битой ракушки (ИГЭ 7). Граница выделяется на глубинах от 3,5 до 5,5 метров. Отражение малоконтрастное, что связано с тем, что при переходе через границу от вышележащих глин (ИГЭ 3) к суглинкам (ИГЭ 7) существенного изменения скоростей поперечных волн не наблюдается. Кровля песков мелких, пылеватых (ИГЭ 8). Граница выделяется на глубинах от 7 до 10,5 метров и также является не очень контрастной. На участках вблизи коллектора, который вдоль всего участка залегает до-

вольно близко к границе между песками и суглинками, граница перестаёт прослеживаться, поскольку гиперболы дифракции от коллектора накладываются и интерферируют с отражением, затрудняя его надёжное выделение. Кроме того, нужно сказать, что на ряде профилей, в частности №2 и 3, рельеф кровли песков резко прогибается, что может свидетельствовать о наличии просадки грунтов непосредственно над коллектором. На профиле №4 над коллектором наблюдается прерывание осей синфазности в отражении от кровли песков, что, по-видимому, так же связано с просадкой, но произошедшей на меньшей площади (иными словами, выделенная область просадки на данном профиле сужается). При этом в рельефе поверхности и рельефе кровли суглинков просадочные процессы на вышеуказанных профилях не проявлены или почти не проявлены. Это говорит о том, что просадка на данном участке присутствует на отметках приблизительно от -5 до -9 метров, но в перспективе может образоваться и выше. На профилях в восточной части участка (профиля 5 и 6) непосредственно над коллектором наблюдается прогиб всех выделенных отражающих границ: и кровли песка и кровли суглинков. Подобное поведение границ свидетельствует о наличии такой же просадки, как на профилях 2-4 в центральной части участка, но уже проявленной до самого верха (геоморфологически в рельефе поверхности просадка между скважинами 4-5-10 также выделяется). Положение выделенных просадочных структур на плане приведено на рисунке 1.3.3. В наибольшей степени они проявлены между скважинами 2 и 7, где, как было сказано выше, они присутствуют на отметках приблизительно -5 – 9 метров и на данный момент не проявлены выше, и между скважинами 4 и 10, где они наблюдаются от дневной поверхности до самого коллектора. Также нужно сказать, что в данном случае речь идёт только о просадках над коллектором. Для оценки поведения грунтов под ним необходимо ориентироваться на результаты межскважинного акустического просвечивания и РВГИ. Итоговые глубинные разрезы с результатами интерпретации приведены на рисунках 4.3.16 - 4.3.21. Выводы Геофизические работы на объекте: «Строительство канализационного коллектора №62 в городе Ростов-на-Дону. II этап» Этап II.I» были выполнены в полном объёме. По результатам работ были сделаны следующие выводы: Было определено фактическое положение коллектора. Верхняя кромка коллектора располагается на абсолютных отметках от -5.6 до -8.2 метров. Наименьшие значения наблюдаются в центральной части обследуемого участка. По результатам наземной сейсморазведки было уточнено литологическое строение участка работ в межскважинном пространстве, в частности было уточнено положение кровли четвертичных суглинков (ИГЭ 7) и кровли песков (ИГЭ 8). На ряде профилей непосредственно над коллектором наблюдаются воронкообразные проседания отражающих границ или потеря их прослеживаемости, что свидетельствует о наличии просадочных структур в грунтах, залегающих выше коллектора. Положение выделенных просадочных структур на плане приведено на рисунке 1.3.3. В наибольшей степени они проявлены между скважинами 2 и 7, где они присутствуют на отметках приблизительно -5 – 9 метров и на данный момент не проявлены выше, и между скважинами 4 и 10, где они наблюдаются от дневной поверхности до самого коллектора. По результатам наземной сейсморазведки на продольном типе волн было установлено положение уровня грунтовых вод на момент проведения работ. В целом УГВ залегает на абсолютных отметках -0.6 - -1.2 метров. На профиле №1 (ПК 2-16), выполненном

вблизи колодца 37, и на профилях №5 и 6, выполненных вблизи колодца 36, наблюдаются небольшие погружения УГВ до отметок -2 - -2.5 метров, что может быть следствием дренирования грунтовых вод в колодцы. В перспективе подобные процессы могут привести к возникновению техногенной суффозии и небольшим просадкам в самом верхнем слое грунтов значительно выше самого коллектора. Раздел 5. Применение отраженных волн в методе межскважинного просвечивания В настоящей работе была предпринята попытка реализации такого метода обработки данных МСП, как метод параметризации системы координат глубинных точек, или же «Crosswell CDP» метод в зарубежной литературе (Smalley, 1991). Целью работы являлось полное освоение теоретических аспектов метода и реализации рабочего инструмента для осуществления процесса получения акустического изображения геологической среды по данному методу. Для достижения поставленных целей были использованы наборы как модельных данных, сгенерированных самостоятельно, так и реальных данных, полученных при инженерных изысканиях в Нижегородской области, г.Дзержинск. На текущий момент времени основным результатом работ по методу МСП в инженерно-геологической отрасли является скоростной разрез продольных и/или поперечных волн, получаемый в ходе временной томографической (далее в работе – просто томографической) инверсии. Как известно, томографическая инверсия использует в качестве входных данных лишь первые вступления целевых волн, а не все наблюденное волновое поле. Более того, естественные ограничения, связанные с положениями о корректности и регуляризации, которые накладываются на решение томографической инверсии чаще всего предполагают его гладкость (Болгаров, Рослов, 2009). Таким образом, в подавляющем большинстве случаев, результаты работ методом МСП содержат в первую очередь интегральную характеристику исследуемой среды (Тихоцкий и др, 2014). Метод МСП-ОГТ, в свою очередь, предполагает получение классического изображения среды в поле отраженных волн, что по сравнению с томографической инверсией, позволяет восстановить геометрию контрастных границ и внедрить в получаемый результат информацию в полной волновой картине. Положения о методе МСП-ОГТ вкупе с примерами применения в нефтяной сейсморазведке впервые были опубликованы в 1997 году (). Тем не менее, на сегодняшний момент в открытых информационных источниках не существует научных трудов, в которых данный метод был задействован в применении к инженерным сейсморазведочным данным. Актуальность данной работы обоснована именно такой попыткой применения метода. Полевые данные и другие необходимые для настоящего исследования материалы были получены (август 2021 г.). В настоящей работе были широко задействованы различные программные решения. Для сигнальной обработки модельных и реальных данных была использована система «RadExPro» (Компания «RADEXPRO SEISMIC SOFTWARE LLC»). Для моделирования была задействована открытая python-библиотека «Devito». Для томографической инверсии была использована программа «ZondST2D» (Разработчик Каминский А.Е.). Помимо этого, лично автором было создано программное решение в среде «Matlab», позволяющее осуществлять полную обработку методом МСП-ОГТ.

Раздел 5.1. Применение метода МСП-ОГТ на модельных данных Для опробования теоретических положений, представленных в главе 1.2 полный цикл процедур в рамках метода МСП-ОГТ был применен к модель-

ным данным. Моделирование Моделирование сейсмических данных было осуществлено при использовании открытой Python-библиотеки «Devito». Данная библиотека заслужено признана в научном сообществе, поскольку ее разработчики имеют множество публикаций. Библиотека позволяет осуществлять двумерное упругое моделирование сейсмических данных по ячеистой модели (Thorbeke, 2011) с помощью метода конечных разностей (Thorbeke, 2021). Именно этот подход был использован при моделировании. Для определения волнового поля в произвольный момент времени используется следующая система уравнений: В качестве функции сигнатуры источника был использован импульс Рикера с частотой 250 Гц (Рисунок 27). Хотя и частоты данного порядка не являются типичными для электроискровых источников, часто используемых в методе МСП, данной частоты, как будет показано позже, хватает для получения удовлетворительного результата. Ограничение частоты связано в первую очередь с экономией времени в процессе моделирования, но не влияет на итоговую разрешенность событий на синтетических данных.

Параметры покрытия источниками и приемниками соответствуют полнолучевой схеме, то есть источники и приемники расположены вдоль всего ствола излучающей и приемной скважины. Шаг ПП и ПВ одинаковый и равен одному метру, таким образом объем моделирования составляет 151 сейсмограмму ОПВ, в каждой из которых содержится 151 трасса (итого 22801 сейсмических трасс). В качестве записей волнового поля, используемых для дальнейшей обработки, была использована вертикальная компонента скорости смещения частиц - v_y (t,x,y). Пример полученных в ходе моделирования данных представлен на Рис. 28 и Рис. 29 для сейсмограмм ОПВ и ОПП соответственно. Представленные данные полностью соответствуют заданной модели. Об этом свидетельствует наличие на сейсмограмме ОПВ для источника с нулевой ординатой восходящих отраженных монотипных P-; и отраженных обменных SV-волн, оси синфазности которых зарождаются на глубинах ПП, соответствующих 17 и 68 м соответственно (глубины контрастных границ в использованной модели), помимо этого, на этих же глубинах ПП на записи присутствуют две нисходящие преломленные обменные SV-волны. Полностью аналогичная картина наблюдается на сейсмограмме ОПВ для источника с ординатой 151 м, однако характер направленности волн (восходящие или нисходящие) в данном случае обратный первому случаю. Предобработка модельных данных Для подготовки данных к процедурам метода МСП-ОГТ были использованы следующие процедуры: Пикировка первых вступлений Подавление прямой волны Разделение восходящих и нисходящих отраженных волн Пикировка первых вступлений происходит стандартным образом, пример пикировки представлен на Рис. 30.

После осуществления пикировки первых вступлений можно приступать к процедуре подавления прямой волны, данный процесс описан в гл. 1.2.3. Пример данных до и после подавления прямой волны представлен на Рис. 31.

После успешного подавления прямой волны, последним шагом подготовки данных является разделение восходящих и нисходящих отраженных волн. Как было указано ранее, данную процедуру можно осуществить с помощью f-k фильтрации. Для выделения восходящих волн используется фильтрация отрицательных пространственных частот, а для выделения нисходящих – фильтрация положительных. Пример данных с выделенными нисхо-

дящими и восходящими отражениями представлен на Рис. 32. Необходимо отметить, что обменные волны не удалось подавить в достаточной степени, так как их кинематические характеристики привели к появлению аляйсинга в f-k спектре (Рисунок 33). Вследствие этого участки спектра, соответствующие обменным и монотипным волнам, в значительной степени пересекаются. Томографическая инверсия Промежуточным этапом обработки является осуществление томографической инверсии по пикировкам первых вступлений. Как было указано в главе 1.2.4, скоростная модель, полученная по данным томографии, необходима для корректировки глубины общих глубинных точек при процедуре скоростного анализа. Томографическая инверсия была выполнена в программном пакете «ZondST2D» (разработчик Каминский А.Е.). Для инверсии был использован блочный алгоритм, так как он позволяет получать весьма разрешенную модель при малом количестве параметров, определяющих разрез (Marquardt, 1963). В качестве начальной модели для инверсии, была выбрана гладкая модель с градиентом скорости. Параметры инверсии, выбирались исходя из попытки имитации обработки реальных данных при минимальном количестве априорных данных (неизвестная начальная модель, допущение, что среда близка к контрастной и горизонтальной по строению). Инверсия выполнялась до тех пор, пока невязка не составила менее 1 % Скоростная модель, полученная в ходе томографической инверсии, представлена на Рис. 34. Данная модель весьма хорошо соответствует истинной. На последующем этапе данная скоростная модель будет использована для корректировки глубины общих глубинных точек. Скоростной анализ Для скоростного анализа модельных данных была использована программа «Crosshole Velan», лично реализованная автором настоящей работы. Программа написана на языке «Matlab» и позволяет: Проводить расчет координат общих глубинных точек и формировать соответствующие ансамбли (сейсмограммы ОГТ) Оценивать функции скорости суммирования для горизонтальных и вертикальных (HNMO и VLMO) поправок в общих глубинных точках Строить сетку скорости суммирования v_st= v_st (x,y,r) для всей съемки. Осуществлять кинематические поправки и суммирование по ОГТ Для процедуры скоростного анализа были выбраны опорные ОГТ, указанные в Таблица 2. Итого для процедуры скоростного анализа было выбрано 20 точек, расположенных вдоль контрастных границ модели. Для удобства составления функции скорости суммирования, точки, расположенные вдоль верхней (18 м) границы модели были проанализированы только на нисходящих волнах, а точки, расположенные вдоль нижней (69 м) границы – только на восходящих. Несмотря на то, что при работе с модельными данными заблаговременно известны параметры модели, опорные ОГТ должны выбираться исходя из результатов томографической инверсии и наличия признаков отраженных волн на сейсмических записях. Как было указано ранее, на записях присутствуют соответствующие признаки, а модель, полученная в ходе томографии, является весьма контрастной. В совокупности эти факторы полностью обосновывают выбор опорных ОГТ для оценки скорости суммирования. На Рис. 35 представлен скриншот программы «Crosshole Velan», на котором изображен процесс подбора скорости суммирования для точки ОГТ с абсциссой 30 м (параметр α=45°) и ординатой 69 м. В окне программы можно наблюдать исходную анализируемую сейсмограмму ОГТ (№ 1), сейсмограмму ОГТ после ввода вертикальных кинематических поправок (№ 2), сейсмограмму ОГТ после ввода обеих

поправок (№ 3). Под исходной сейсмограммой расположена таблица для изменения функции скорости суммирования по усмотрению пользователя, а скорости суммирования, соответствующие сейсмограммам № 2 и 3 расположены непосредственно под ними (№ 4). В левой части окна программы расположено меню (№ 5), с помощью которого можно загружать сейсмические данные в формате SGY, загружать и сохранять результаты скоростного анализа, инспектировать сетку суммирования, а также регулировать координаты нужной глубинной точки и расстояние между скважинами. На исходной сейсмограмме ОГТ красным цветом изображен результирующий годограф, соответствующий величине поправок, рассчитанных согласно оцениваемой скорости суммирования. Сейсмограммы для некоторых опорных ОГТ, а также функции скорости суммирования представлены на Рис. 36 и Рис. 37. Как можно заметить, процедура скоростного анализа в достаточной степени позволила спрямить годографы отраженных волн в представленных опорных точках. Однако, можно заметить, что для представленных точек в области начальных значений параметра R отраженная волна не вполне находится на нулевом времени. Это связано с тем, что для этих значений параметра скоростной анализ в точности проводить нет необходимости, так как они отвечают довольно большим углам падения, при которых значительно искажается импульс отраженной волны (Sheriff, Geldart, 1995). Например, для расстояния между скважинами в 60 м, значения параметра R от 0 до 25 м соответствуют углам падения от 0 до 10 градусов. Трассы, отвечающие малым углам падения, в дальнейшем исключались из процедуры построения изображения среды. После проведения скоростного анализа в опорной глубинной точке необходимо выполнить процедуру корректировки глубины точки, для этого используется сравнение функции скорости суммирования, полученной в ходе скоростного анализа и функции скорости суммирования, оцененной по томографической модели. Процедура корректировки выполняется так, как было описано в гл. 1.2.4. На Рис. 38 представлены функции скорости суммирования для опорной точки с координатами (30, 18 м). Невязка исходной глубины опорной точки ОГТ рассчитывается по минимально возможному значению параметра R. Как можно заметить, скорость суммирования, оцененная в ходе скоростного анализа весьма близка к таковой, оцененной по результатам сейсмической томографии. Для расчета было использовано значение параметра R, равное 2 м. Значение невязки исходной глубины опорной точки составило -0.3 м, таким образом, данная точка была отнесена к глубине 17.7 м. Пример положения опорных точек ОГТ до и после корректировки глубины в ходе оценки скоростей суммирования представлен на Рис. 39. По функциям скорости суммирования, полученным в ходе скоростного анализа в опорных точках, были построены кубы скоростей суммирования для восходящих и нисходящих волн. Пример куба скоростей суммирования для нисходящих волн представлен на Рис. 40. Суммирование по ОГТ После построения кубов скоростей суммирования для нисходящих и восходящих событий можно переходить к процедуре суммирования по ОГТ. Алгоритм суммирования, заложенный в программу «Crosshole Velan» получает на вход четыре массива данных -сейсмические данные с восходящими и нисходящими отраженными волнами, а также соответствующие им кубы скоростей суммирования. Алгоритм суммирования в программе «Crosshole Velan» полностью соответствует описанному в гл. 1.2.5. Таким образом, на выходе из алгоритма суммирования, программа

позволяет получить два глубинных разреза ОГТ, построенных по нисходящим и восходящим волнам. Глубинные разрезы, полученные в результате суммирования по ОГТ для модельных данных, представлены на Рис. 41. Для получения итогового глубинного разреза необходимо вычесть амплитуды разреза, построенного по нисходящим волнам из амплитуд разреза, построенного по восходящим. Итоговый глубинный разрез ОГТ, полученный по модельным данным представлен на Рис. 42. Результат ожидаемо обладает высокой степенью визуального соответствия заданной модели среды, как по геометрии границ, так и по динамическим параметрам, однако необходимо отметить следующие недостатки: Изображение среды получено не для всех точек сетки суммирования. В крайних частях разреза расположены нулевые амплитуды. Это связано с тем, что данным точкам соответствуют отражения, сформированные в непосредственной близости от излучающей/приемной скважины. В данных точках среды отраженные волны не успевают в полной мере разделиться с прямыми. В части разреза, соответствующей глубинам 17-69 м, присутствуют незначительные артефакты, порожденные по причине наличия обменных SV-волн на записях. Геометрия границ не в полной мере горизонтальная, у границ присутствует незначительная кривизна. Это связано в первую очередь с тем, что при процедуре корректировки глубины опорных глубинных точек используется модель, полученная в ходе сейсмической томографии, которая, вообще говоря, не обязательно отражает истинное распределение скорости в среде. Более того, обменные SV-волны, присутствующие на записях могут в незначительной степени искажать геометрию границ. Раздел 5.2. Обработка реальных данных После успешного опробования теоретических положений на массиве из модельных данных, метод МСП-ОГТ был опробован на реальных данных, полученных в ходе инженерно-геофизических изысканий в августе 2021 года. Геологические сведения об объекте исследований Исследуемая площадка находится в северной части г. Дзержинска, в районе ул. Советской. В геоморфологическом отношении район исследований расположен в пределах Волжско-Окской области зандровых и аллювиально-зандровых низин на четвёртой левобережной террасе реки Оки. В структурно-тектоническом плане исследуемый район расположен в пределах Окско-Волжской системы дислокаций Токмовского свода. В плане новейших тектонических движений район располагается в пределах слабоподнятого Пырского блока второго порядка системы Горьковского макроблока, в непосредственной близости от границы его с Окским слабоопущенным блоком второго порядка. Эта граница соответствует зоне повышенной трещиноватости пород осадочного чехла, активной на современном этапе. Подобные неотектонические условия, в определённой степени, могут способствовать развитию карстово-суффозионных процессов. Геологическое строение участка можно охарактеризовать по данным глубоких скважин на «карст», пробуренных ранее, материалам инженерно-геологических изысканий, а также по данным региональных геологических исследований. Сверху до глубины ~ 0,5-4,1 м залегают насыпные грунты. Ниже, до глубины ~50 м вскрываются среднечетвертичные аллювиальные отложения четвёртой надпойменной террасы р. Оки, представленные, в основном, песками различной крупности. В подошве встречаются прослои суглинков, глин, а также включения гравия и гальки осадочных и метаморфических пород. Нижнюю часть разреза четвертичных отложений слагает мучкапско-окский аллювий, выполняющий глубоко

врезанную в дочетвертичные отложения прадолину. Они представлены, в основном, песками. Под четвертичными образованиями вскрываются породы сакмарского яруса нижней перми, сложенные гипсами и ангидритами. Гидрогеологические условия исследуемого района характеризуются наличием двух основных водоносных горизонтов: аллювиального и трещинно-карстового. Водоносный горизонт четвертичных отложений (грунтовые воды) связан с аллювиальными нижнечетвертичными песками, залегающими в основании четвертичной толщи, на глубине 25-30 м. Благодаря суглинкам, перекрывающим водоносный горизонт, воды, по-видимому, характеризуются местными напорами. Нижним водоупором служат уржумские глины, местами нижнечетвертичные суглинки. Из вышеизложенного следует, что степень закарстованности сульфатных и карбонатных пород высокая. Механизм возможной деформации земной поверхности вследствие развития карстопроявления с учётом современной инженерно-геологической обстановки представляется как карстово-обвальный или карстово-суффозионный. Для образования провалов по карстово-обвальному механизму в существующих инженерно-геологических условиях необходимы полости-приёмники значительных размеров (эквивалентными диаметрами в десятки метров). Формирование таких полостей возможно только в достаточно мощных пластах глубокозалегающих сульфатных и карбонатных отложений пермской системы. Методика исследований Всего на территории объекта исследований было отработано 5 пар скважин (ниже излучающая-приемная скважина): 3к – 1к; 1к – 4к; 3к – 2к; 2к – 4к; 2к – 1к. Схема расположения выполненных работ приведена на Рис. 43. Межскважинное просвечивание, та выполнялось по так называемой полнолучевой схеме, суть которой заключалась в регистрации сейсмических лучей из всех фиксированных точек излучающей скважины во все фиксированные точки приемной скважины. То есть томографическая схема предполагает заполнение всего межскважинного пространства пересекающимися лучами. Принципиальный пример такой схемы в сильно разреженном виде представлен на Рис. 44. Расстояния на рисунке выбраны лишь как удобные для восприятия величины. Способ заполнения межскважинного пространства лучами зависит как от применяемых источников, так и от приемников. При выполнении МСП на продольных волнах с использованием 24-х точечной косы использовалась следующая методика. Коса фиксировалась в скважине А так, чтобы нижний канал был на забое. Излучатель при этом перемещался в скважине Б с шагом 1 м весь рабочий интервал (от самой глубокой точки скважины до окончания воды в ней). На каждой точке скважины Б производилось от 5 до 10 накоплений для улучшения соотношения сигнал/шум. Визуализация этой схемы представлена на Рис. 45. На ней синим цветом показаны приемники косы в первом положении, а также лучи, зарегистрированные этими приемниками от источников во второй скважине. Зеленым цветом то же для второго положения косы. Для облегчения восприятия рисунка на косах показаны не 24, а только 6 каналов. Таким образом, шаг между приемниками и источниками при производстве наблюдений по методу МСП на Р-волнах составил 1 м. Выбор, в какой из пары скважин должен располагаться приемник, а в какой источник, не является принципиальным, так как для томографических расчетов требуется знание времени распространения волны из одной точки в другую. Поэтому для каждой пары скважин ее тип (излучающая или приемная) выбирался исходя из удобства размещения приборов или по иным внешним

причинам. На Рис. 46 приведено фото момента выполнения работ по МСП. В качестве регистрирующего оборудования была использована сейсмостанция «ЭЛЛИС-3» (производство ООО «Геосигнал»). Приемной и излучающей аппаратурой послужили 24 канальная пьезокоса «WellStreamer» и спаркер «Pulse» в комплекте с накопителем энергии «Jack-2500HP» соответственно (производство ООО «Геодевайс»). Так как приемная коса базируется на применении пьезоэлементов, а источник имеет электроискровой тип, единственным важным ограничением в полном соблюдении полнолучевой схемы на объекте исследований послужил уровень грунтовых вод в рабочих скважинах. По этой причине от дневной поверхности до забоя скважины системой наблюдения не был покрыт полный интервал. Параметры о покрытии системы наблюдения для каждой пары скважин представлены в Таблица 3. Анализ волновой картины Примеры полученных данных для одной из пар скважин представлены на Рис. 47 и Рис. 48. В первых вступлениях на записях наблюдается преимущественно прямая волна. При подходе источника к нижней границе рабочего интервала на записях отчетливо видна не только прямая, но и головная волна, бегущая по кровле скального основания. Также в первых вступлениях практически повсеместно встречается трубная волна (Рисунок 49), нетрудно отличимая от прямой по значительно более пологому годографу, меньшей интенсивности и меньшему видимому периоду волны. Помимо прямой и головной волны, на сейсмограммах ОПВ присутствуют три отраженные восходящие (показаны голубым цветом) и одна отраженная нисходящая (показана оранжевым цветом) (Рисунок 50). К сожалению, по причине недостаточного покрытия источниками и приемниками стволов скважин, точно установить глубину, на которой образуются отраженные волны № 2 и № 3 не представляется возможным. Тем не менее, наибольшая часть годографов этих волн приурочена именно к рабочему интервалу, что является благоприятным фактором. Первая отраженная восходящая волна образуется на глубинах ПП около 45 м. Вероятнее всего, она приурочена к кровле суглинков, подстилающих четвертичные пески. Вторая из отраженных восходящих волн, исходя из априорной информации, приурочена к кровле скального основания, расположенного на глубинах 64-72 м. Природа третьей отраженной восходящей волны предположительно связана с наличием контрастной границы внутри толщи скальных пород. Ни признаки волновой картины, ни данные бурения не позволяют достоверно предположить глубину этой границы. В рамках разумной экстраполяции, глубина данной границы в дальнейшем всюду была принята за 89-91 м. Единственная нисходящая волна, вероятнее всего, приурочена к кровле четвертичных отложений, расположенной на глубине 5 м. Также на сейсмограммах присутствуют гидроволны, являющиеся помехами (отмечена зеленой линией). Для всех остальных пар скважин, в которых проводилась съемка, конфигурация волновой картины аналогична описанной выше. Предобработка данных Для подготовки реальных данных к процедурам метода МСП-ОГТ были использованы следующие процедуры: Пикировка первых вступлений Подавление прямой волны Разделение восходящих и нисходящих отраженных волн Пикировка первых вступлений происходила нестандартным образом, поскольку в волновой картине, как было указано выше, в значительной степени были проявлены головные волны по кровле скального основания. Поэтому пикировка была выполнена в двух вариантах – с учетом головных волн и без. Пример пикировки представлен на Рис.

51 Так как головные волны в значительной мере отличались от отраженных по динамическим и, в особенности, по кинематическим признакам, их подавление не являлось обязательной задачей для построения изображения среды. После осуществления пикировки можно приступать к процедуре подавления прямой волны. Пример данных до и после подавления прямой волны представлен на Рис. 52. После успешного подавления прямой волны, последним шагом подготовки данных является разделение восходящих и нисходящих отраженных волн. Как было указано ранее, данную процедуру можно осуществить с помощью f-k фильтрации. Пример данных с выделенными нисходящими и восходящими отражениями представлен на Рис. 53. Томографическая инверсия В силу сложности волновой картины и наличию головных волн по кровле скального основания (Рисунок 54), томографическая инверсия выполнялась по двум целевым интервалам: интервалу дисперсных грунтов и интервалу дисперсных грунтов в объединении с породами скального основания разреза. Томографическая инверсия данных выполнялась в программе ZondST2D по алгоритму Оккама (Constable et al, 1987), который был выбран в силу того, что он позволяет наиболее гладкое решение. Гладкие модели дают самый точный результат в условиях, когда заранее однозначно неизвестны положения границ. Принудительная фиксация положений границ по результатам бурения может легко привести к потере возможной аномалии в межскважинном пространстве. Для согласования значений скоростей в точках стыка плоскостей разрезов (скважинах) инверсия выполнялась не отдельно по каждой паре скважин, а длинными профилями, собранными из нескольких пар скважин, причем для стыковки замкнутых профилей, к обоим краям длинного профиля добавлялись краевые пары скважин. Например, для согласования последовательности разрезов 3к-1к-4к-2к-3к в скважине 3к последовательность наращивалась использованием еще двух скважин с краев 2к-3к-1к-4к-2к-3к-1к, которые в дальнейшем удалялись из рассмотрения. Для стыковки другой последовательности разрезов 3к-1к-2к-3к в скважине 3 последовательность наращивалась следующим образом: 2к-3к-1к-2к-3к-1к. Шаг сети для инверсии по оси Z был взят таким образом, чтобы обеспечить наилучшее разрешение по вертикальной оси, и равен шагу между приемниками в скважинах Δz=1м. По оси X шаг взят большим Δx=2м для того, чтобы получить результирующую модель, близкую к горизонтально-слоистой. Для решения задачи картирования скального основания в качестве начальной модели использовалась градиентная модель с линейным возрастанием скорости с глубиной от 1.6 км/с вверху до 4 км/с внизу (Рисунок 55). Скорости начальной модели сверху и снизу выбирались таким образом, чтобы начальная невязка с наблюденным полем времен была минимальной. Лучевое покрытие в результирующей модели представлено на Рис. 56 В ходе длительной процедуры подбора параметров инверсии, было принято решение выполнять расчет со следующими параметрами инверсии: постепенное плавное уменьшение коэффициента сглаживания с 10 до 0.2. Всего было сделано 7 итераций с коэффициентами сглаживания: 10, 7, 5, 2, 1, 0.5, 0.2. Такая последовательность была выбрана, чтобы получить наиболее гладкое и устойчивое распределение скорости в модели. Аспектное отношение эллипса сглаживания было выбрано равным 0.1 (преобладание горизонтальных структур). Процесс инверсии останавливался, когда невязка между наблюденными и рассчитанными временами пробега стабилизировалась. Результирующая модель обрезалась по

лучам, то есть принимались лишь те ячейки, которые содержали хотя бы один луч. Скорости в ячейках, лежащих внутри модели и не содержащих лучей, интерполировались. Для решения задачи исследования дисперсных грунтов в качестве начальной модели использовалась градиентная модель с линейным возрастанием скорости с глубиной от 1.6 км/с вверху до 1.7 км/с внизу. Были сделаны две итерации с коэффициентом сглаживания равным 1. Результаты инверсии представлены на Рис. 57 и Рис. 58. Анализ результатов МСП, нацеленных на изучение коренных пород На Рис. 59-Рис. 61 приведены скоростные разрезы по всем выполненным секциям. Для удобства анализа, секции собраны в группы. При анализе данного набора разрезов, необходимо понимать, что характеристики слоя дисперсных грунтов приводятся менее точно, так как упор делался именно на коренные породы. Обращает на себя внимание хорошее соответствие скоростных разрезов МСП и результатов бурения. Кровля скальных пород имеет рельеф, согласующийся с геологическими колонками, однако, отмечается понижение в районе скважины 1. Значения скоростей Vp в скальных породах достигают 4 и более км/с, что является нормой для сохранных скальных пород. К сожалению, не во всех скважинах удалось опустить приборы ниже кровли скалы, и выполнить полноценное сейсмоакустическое просвечивание именно коренных пород, поэтому имеется только информация о поверхностном слое, полученная анализом головных волн. Результаты геофизических исследований демонстрируют отсутствие выраженных геометрических аномалий в кровле скальных пород по выполненным профилям. Отсутствие флуктуаций скоростей Vp вдоль кровли коренных пород также свидетельствует об отсутствии аномалий, связанных с сильным выщелачиванием, которые бы отразились в поле скоростей. Анализ результатов МСП, нацеленных на дисперсные породы Как правило карстовые процессы затрагивают не только непосредственно выщелачиваемые скальные породы, но дисперсные породы, находящиеся в непосредственном контакте с карстующимися скальными. Для выявления подобных ситуаций был выполнен детальный анализ результатов просвечивания дисперсных грунтов. Высокому качеству полученных результатов способствовала полнота системы наблюдений, нацеленных на изучение дисперсных пород. Скоростные разрезы, полученные для толщи дисперсных пород, представлены на Рис. 62 - Рис. 64. Дисперсные грунты характеризуются значениями скоростей Vp в среднем от 1.6 до 1.7 км/с, что является типичным для подобных грунтов. Флуктуации скорости очень незначительны, в пределах погрешности метода измерений. Обращает на себя внимание локальное понижение скоростей в районе скважины 4к до отметок 1.4 км/с. Отклонение составляет около 15% от фонового значения, что явно превышает погрешность метода. А близкое расположение к скважине (к точкам наблюдения) также свидетельствует о достоверности наличия аномалии. В рамках выполненных исследований определить геологическую природу аномалии не представляется возможным. Полученные скоростные разрезы были использованы в качестве априорной информации при процедуре скоростного анализа отраженных волн, а именно, для корректировки глубины точек ОГТ.

Скоростной анализ Рассмотрим процедуру скоростного анализа для пары скважин 3к-2к. Для скоростного анализа модельных данных была использована программа «Crosshole Velan», упомянутая в гл. 2.4. Для процедуры скоростного анализа были выбраны опорные ОГТ, указанные в Табли-

ца 4. Итого для процедуры скоростного анализа в паре скважин 3к-2к были выбраны 21 шт. точек, расположенных вдоль контрастных границ модели. Для удобства составления функции скорости суммирования, точки, расположенные вдоль верхней (15 м) границы модели были проанализированы только на нисходящих волнах, а точки, расположенные вдоль нижних (69 м, 90 м) границ – только на восходящих. Для анализа границы, расположенной по предварительным признакам на глубине 45 м, была проанализирована только одна точка, равноудаленная от излучающей и приемной скважины. Для точек даже в незначительной степени отстоящих от нее по горизонтали, скоростной анализ выполнить не удалось, так как целевая отраженная волна не была выявлена на сейсмограммах ОГТ. Наборы опорных точек ОГТ для всех остальных пар скважин отличались незначительно как по количеству точек, по типу волн, по параметру глубины, так и параметру α,°, определяющему абсциссу точки. Выбранные опорные ОГТ полностью соответствуют априорной информации, признакам наличия отраженных волн на записях и томографической модели. Сейсмограммы для некоторых опорных ОГТ, а также функции скорости суммирования представлены на Рис. 65 и Рис. 66. Как можно заметить, процедура скоростного анализа в достаточной степени позволила спрямить годографы отраженных волн в опорных точках. После проведения скоростного анализа в опорной глубинной точке необходимо выполнить процедуру корректировки глубины точки, для этого используется сравнение функции скорости суммирования, полученной в ходе скоростного анализа и функции скорости суммирования, оцененной по томографической модели. Процедура корректировки выполняется так, как было описано в гл. 1.2.4. На Рис. 67 представлены функции скорости суммирования для опорной точки с координатами (15.1, 15 м). Невязка исходной глубины опорной точки ОГТ рассчитывается по минимально возможному значению параметра R. Как можно заметить, скорость суммирования, оцененная в ходе скоростного анализа, значительно отличается от таковой, оцененной по результатам сейсмической томографии. Для расчета было использовано значение параметра R, равное 20 м. Значение невязки исходной глубины опорной точки составило -5 м, таким образом, данная точка была отнесена к глубине 10.1 м. Пример положения опорных точек ОГТ до и после корректировки глубины в ходе оценки скоростей суммирования представлен на Рис. 68. Заметим, что корректировка глубины точек, расположенных ниже глубины 69 м, не выполнялась, так как они находились ниже рабочего интервала, для которого не определена скоростная модель. По функциям скорости суммирования, полученным в ходе скоростного анализа в опорных точках, были построены кубы скоростей суммирования для восходящих и нисходящих волн. Пример куба скоростей суммирования для нисходящих волн представлен на Рис. 69. Суммирование по ОГТ Процесс суммирования по ОГТ для реальных данных полностью аналогичен описанному в гл. 2.5 для модельных данных. Результаты суммирования по ОГТ для пары скважин 3к-2к на нисходящих и восходящих волнах представлены на Рис. 70. В качестве незначительного дополнения к процедуре суммирования можно добавить ограничение домена, для которого будут строиться разрезы на нисходящих и восходящих волнах. Подобная процедура уместна только тогда, когда отражающие границы выделяются лишь в одном типе волн. Так, например, граница, приуроченная к подошве насыпных грунтов, проявляется только в нисходящих отраженных волнах

и поэтому разрез для нисходящих волн содержит значения амплитуд только до глубин 40-45 м, а разрез на восходящих волнах, напротив, от глубин 40-45 м. После получения глубинных разрезов ОГТ по нисходящим и восходящим волнам последним шагом является их суммирование для получения итогового глубинного разреза (Рисунок 70). Раздел 5. 3. Анализ результатов исследования Итоговые глубинные разрезы представлены в приложении. Разрезы по всем парам скважин были сопоставлены с геологическими колонками, также на разрезах были протрассированы отражающие границы. К каждому разрезу прилагается описание. Полученные разрезы являются полноценным изображением среды в межскважинном пространстве, отражают геометрию границ и контрастность акустических свойств. Комплексный анализ результатов Для комплексного анализа результатов итоговые глубинные разрезы по каждой паре скважин были сопоставлены согласно их пространственным координатам. На Рис. 71-Рис. 72 представлена трехмерная сборка по всем разрезам с различных ракурсов. Полученные разрезы принципиально, то есть по конфигурации восстановленных отражающих границ, согласуются между собой. Выделенные границы на участках стыков разрезов также являются увязанными. Тем не менее, вопрос увязки границ на пересекающихся разрезах для данного метода остается открытым, так как в случае объекта исследования увязка границ осуществилась непреднамеренно. Несоответствия на пересечениях разрезов могут быть вызваны в первую очередь тем, что скоростной анализ проводится независимо для каждой пары скважин. В наземной 2D сейсмозарведке существует следующая практика увязки пересекающихся разрезов: В месте пересечения двух разрезов выбирается один общий бин, или несколько бинов, объединенных в больший по размеру супер-бин, при этом скоростной анализ проводится с учетом общего бина. Данный подход позволяет эффективно увязать между собой отражающие горизонты. В силу особенности аппарата скоростного анализа в методе МСП-ОГТ (анализ каждой истинной глубинной, а не средней тиочки) и текущей стадии его проработки, возможность реализация аналогичного аппарата увязки неочевидна, поэтому можно признать наличие нестыковок на итоговых глубинных разрезах прямым недостатком метода. Помимо этого, вопросы вызывает различие динамической картины на разрезах, так, например, видимый период импульсов на оси синфазности, приуроченной к кровле скального основания на разрезе 4к-1к значительно меньше, чем на любом другом. Данный эффект можно объяснить фактором индивидуального различия в динамических характеристиках данных для разных пар скважин. Так, например, расстояние между скважинами 4к-1к составляет всего 13.8 м, что в среднем в 3 раза меньше, чем расстояние в любой другой паре скважин. Импульс волны, отраженной от кровли скальных пород по частотному составу, значительно отличается для пары скважин 4к-1к от любой другой, что продемонстрировано на Рис. 73. Также для совместного анализа результатов, полученные глубинные разрезы были наложены на скоростные разрезы, полученные по результатам томографической инверсии. Совмещенные скоростные разрезы и разрезы ОГТ представлены в приложении. Скоростные разрезы для всех пар скважин имеют высокую сходимость с результатами МСП-ОГТ, особенно наглядно это проявлено для пары скважин 4к-1к, где было выявлено значительное падение кровли пород скального основания. Данное падение было также подтверждено по результатам МСП-ОГТ, что подтверждает возможность

работы данным методом в условиях двумерной неоднородности исследуемой среды. Выводы В качестве выводов по проделанной работе можно привести следующие утверждения о методе МСП-ОГТ (ниже просто «метод»): Рассмотренный метод позволяет успешно получать акустические изображения межскважинного пространства удовлетворительного качества в рамках инженерных изысканий Метод применим для двумерно-неоднородных сред Метод имеет высокую разрешающую способность, соответствующую частотным характеристикам записям МСП, которые, в свою очередь, являются результатом работы высокочастотными электроискровыми источниками Метод является весьма чувствительным к геометрии системы наблюдения и параметрам покрытия источниками и приемниками рабочего интервала Метод позволяет восстанавливать события за пределами покрытия системы наблюдения в рамках разумной экстраполяции Результаты, получаемые данным методом, имеют высокую достоверность, так как события на записях МСП могут быть однозначно привязаны к данным бурения Метод демонстрирует высокую степень сходимости с данными временной сейсмотомографии Принципиальная схема обработки метода является сравнительно сложной и требует дальнейшей доработки в аспектах динамического анализа данных и увязки данных для пересекающихся разрезов Метод требует обязательного выполнения обработки методом временной сейсмической томографии и выступает в качестве ее дополнения, но не альтернативы Полученные выводы полностью обоснованы проделанной работой над массивами модельных и реальных данных и подкреплены источниками литературы. Раздел 6. Применение георадиолокации для исследования приповерхностной части геологического разреза Раздел 6.1. Картирование ландшафтных границ В отчётном году была завершена работа по выделению границы между моренно-водноледниковым и долинно-зандровым ландшафтами комплексом методов георадиолокации (50 и 250 МГц) и электротомографии с шагом 1 м между электродами. Исследования проводились в прошлом году на ландшафтном стационаре Географического ф-та МГУ «Лесуново» совместно с к.ф.-м.н. А.А. Бобачёвым (МГУ). Помимо геофизических методов применялись классические ландшафтные исследования и бурение. На примере профиля, пересекающего предполагаемую ландшафтную границу, было показано, что особенности литологии, рельефа и водонасыщенности, находят своё отражение в радарограммах и геоэлектрических разрезах. Данные обоих методов взаимно дополняли друг друга по разрешающей способности и глубинности. Основным выводом работы стало картирование границы глинистых моренных и песчаных отложений. Граница имеет вид уступа (Рисунок 1), что, в комплексе с ландшафтными исследованиями и изучением имеющихся карт оледенения, позволило нам реконструировать условия формирования местности в позднеледниковье. Результаты отражены в статье: Landscape mapping using ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography survey and landscape profiling / V. M. Matasov, S. S. Bricheva, A. A. Bobachev, Mironenko I. V., Fedin A. V., Sysuev V. V., Zolotaya L. A., Roganov S. B. // AIMS GEOSCIENCES. — 2022. — Vol. 8, no. 2. — P. 213–223.

Раздел 6.2. Изучение погребённого русла водотока на территории Москвы Завершено исследование ложбины водотока, располагавшегося на территории ныне не существующего Златоустовского монастыря в Москве. Гипотеза о существовании водотока была выдвинута на основании анализа архивных материалов (планов и описей монастыря), геологических данных

(материалы бурения 1960-х гг. и карта кровли четвертичных отложений). Проверка гипотезы производилась при помощи метода георадиолокации. На профиле, пересекающем русло предполагаемого водотока, обнаружены границы кровли техногенных грунтов и чашеобразное понижение, заполненное по материалам бурения водонасыщенными песками (Рисунок 2). Возможное положение водотока было установлено с использованием исторических данных о реконструкции речной сети Москвы и карт рельефа местности. Результаты опубликованы в статье: Бричева С. С., Матасов В. М., Владов М. Л. О местоположении водотока (ручья) на территории Златоустовского монастыря по геологическим и геофизическим данным // Златоустовские чтения. Сборник докладов научно-практической конференции 2021. — Т. 6. — Москва, 2022. — С. 162–178.

Раздел 6.3. Комплексный анализ генезиса гигантской ряби течения Одним из дискуссионных вопросов современной геоморфологии является происхождение гигантской ряби течения – ландшафтов, представляющих собой грядово-ложбинный рельеф, простирающийся на несколько километров. Одним из таких объектов является Курайское грядовое поле в одноименной котловине Горного Алтая. Поле имеет размеры около 4 км в длину и 3 км в ширину, гряды сложены валунно-галечным материалом. По мнению большинства исследователей, данное грядовое поле сформировалось в результате воздействия на дно впадины катастрофического водного потока, образовавшегося при прорыве плотины ледниково-подпрудного озера в Чуйской котловине, расположенной к востоку. Однако существуют и другие версии. В отчётном периоде было завершено изучение поля гигантской ряби методом георадиолокации совместно с морфометрическим анализом поверхности. При помощи георадиолокации было изучено строение более чем 50 гряд в разных частях поля, выделены их особенности и типы в зависимости от расположения в пространстве. Внутреннее строение гряд по данным георадиолокации типично для русловых гряд на дне рек – в поперечном сечении однозначно выделяются одна или несколько косослоистых пачек с падением слоев в направлении потока (Рисунок 3). При помощи морфометрического анализа по материалам дистанционного зондирования было изучено пространственное показатели ряби. Такие же показатели были рассчитаны для серии объектов-аналогов различного генезиса. Путем статистического сравнения было показано, что гряды Курайской котловины близки к аккумулятивным формам, образованным на дне водных потоков, и значимо отличаются от моренных и эрозионных геоморфологических ландшафтов. Результаты опубликованы в статье: С. С. Бричёва, Т. В. Гоников, А. В. Панин, Деев Е.В., Матасов В.М., Дорошенков М.М., Энтин А.Л., Лобачева Д.М. О происхождении грядового рельефа Курайской котловины (юго-восточный Алтай) в свете морфометрических и георадарных исследований // Геоморфология. — 2022. — Т. 53, № 4. — С. 25–41. DOI: 10.31857/S0435428122040034

Раздел 6.4. Изучение пространственной динамики галоклина Проведены первые опытно-методические работы по изучению пространственной динамики границы речного плюма р. Бзыбь методом георадиолокации с участием специалиста-океанолога д.ф.-м.н. А. А. Осадчиева (ИО РАН) и к.ф.-м.н. Н.Ю. Боброва (СПбГУ). Речным плюмом называется водная масса, выносимая в море речным потоком. В результате перемешивания пресного речного стока и солёных морских вод возникает своего рода «конус выноса» реки,

состоящий из солоноватой воды. В 2011–2014 гг. С.С. Бричёва при помощи георадара изучала речной плюм р. Кереть в Белом море. Тогда было показано, что этот метод обладает чувствительностью к изменению солёности (проводимости) воды, и возможно с его помощью изучать тонкую структуру границы пресных и солёных вод (галоклин). Спустя годы подобные исследования были впервые проведены на северо-восточном побережье Чёрного моря. Антенна георадара с частотой 700 МГц перемещалась в лодке через плюм, одновременно выполнялись точечные замеры солёности при помощи зонда CTD (Conductivity, Temperature, Depth) и фотосъемка с БПЛА. Первые результаты показали, что смешивание пресной и солёной воды в плюме р. Бзыбь происходит достаточно интенсивно и приводит к быстрому засолонению приповерхностного слоя, что ограничивает проникающую способность георадара. Радар выявляет короткопериодные (длина волны от 1 до 10 м) колебания в приповерхностном слое, вероятно, возникающие в процессе смешивания пресных и солёных вод, которые не могут быть зарегистрированы зондом CTD при принятом шаге измерений по глубине (20 см). Наличие этих колебаний говорит о сложной динамике процессов в плюме, и радар, по-видимому, имеет большой потенциал для их исследования. Благодаря высокой разрешающей способности георадар регистрирует сложную структуру границы (внутренние волны с разными периодами и амплитудой), не доступную для регистрации другими методами. Исследования будут продолжены, а результаты опубликованы. Раздел 6.5. Связь динамических характеристик радарограммы со свойствами четвертичных отложений Поиск связи динамических характеристик радарограммы с параметрами, определяемыми при лабораторных анализах, является одной из тем, развивающихся на кафедре сейсмометрии и геоакустики при участии С.С. Бричёвой. В мае 2022 г. М.А. Тарасова успешно защитила магистерскую под научным руководством С.С. Бричёвой на тему «Динамические характеристики радарограмм на примере песчано-глинистых отложений» и продолжила разрабатывать данную тему в аспирантуре. М.А. Тарасова собирала первый материал для написания диссертации в ходе полевых работ под руководством С.С. Бричёвой летом 2022 г. в районе комплекса позднепалеолитических стоянок «Быки» в Курской области. Полевые данные включают в себя георадарные профили, на которых зарегистрированы несколько отражающих границ. На выбранных участках произведено бурение с описанием отложений и отбором образцов на следующие виды анализов: гранулометрический состав, магнитная восприимчивость, влажность, диэлектрическая проницаемость (вещественная и мнимая части), проводимость в частотном диапазоне 10 МГц-3 ГГц. Области изменения этих параметров выделяются и сравниваются с графиками динамических характеристик георадарных трасс в районе скважины. Исследование будет продолжено в следующем году, а результаты представлены на семинаре МГУ «Современные проблемы геофизики».

Раздел 7. Применение георадиолокационного зондирования для определения скоростей электромагнитных волн в дорожной одежде Работы методом георадиолокационного зондирования были выполнены в рамках сопоставительных испытаний отечественных георадаров для более точного определения глубины границ и заверки данных георадиолокационного профилирования. Зондирования – это измерения с изменением расстояния между источником и приёмником. Фото проведения работ представлено на

рис.7.1. Измерения проводились по методике общего пункта приёма (ОПП). При такой методике приёмник остаётся на месте, а излучающая антенна провозится в непосредственной близости от источника по прямой линии, параллельной линии профиля. Длина расстановок была равна 5 метрам, для привязки использовалась рулетка, метки ставились каждые 20 см. Во время измерений использовался георадар Zond-12e с антеннами 900 МГц (использовалась как приёмная) и 1500 МГц (использовалась как излучающая). Выбор этих антенн основывался на том факте, что среда является фильтром низких частот, так что центральная частота излучённого сигнала (1500 МГц) при переходе через среду сместится в сторону более низких частот. Антенны ориентировались так, что оси диполей были параллельны друг другу и перпендикулярны линии профиля. Одновременно для более однозначной интерпретации на тех же участках, на которых проводилось зондирование, было выполнено георадиолокационные профилирование. Профилирование проводилось по трём профилям, проходящим через точку зондирования. Профили 1 и 2 располагались вдоль расстановки, профиль 3 – перпендикулярно. Схема расположения профилей показана на рис. 7. 2, точка зондирования совпадает с точкой пересечения профилей 2 и 3. Для профилирования использовался георадар «ОКО-3», антенна 1700 МГц. Обработка данных профилирования проводилась в программе GeoScan 32, данных зондирования – в программе RadexPro. Обработка включала в себя стандартные процедуры: ввод геометрии (только для данных зондирования), полосовую фильтрацию и коррекцию амплитуд. Далее по данным зондирования по годографам отражённых волн определялась эффективная скорость. Эффективная скорость - это скорость распространения электромагнитной волны, вычисляемая по годографам отраженных волн в предположении, что среда выше границы однородная, а граница –плоская. Такое приближение вполне применимо для исследуемой среды (дорожной одежды). Скорость определялась для границ, отражения от которых выделялись как на радарограммах профилирования, так и на радарограммах зондирования. Эффективная скорость определялась по теоретическим годографам отражённых волн, которые «прикладывались» к осям синфазности отражённых волн на радарограммах зондирования до лучшего совпадения. Минимальное время отражения на радарограммах зондирования сверялось со временем отражения на данных профилирования. Процесс определения скоростей показан на рис.7.3. На рис.7.3, а приведены данные профилирования, полученные на профиле 3 точки 4. Зелёной линией показана метка, поставленная на положении приёмника точки зондирования (середина расстановки). Чёрной линией показано время отражения от границы, для которой определялась скорость. На рис.7.3, б приведены данные зондирования, полученные на точке 3. Синей линией показана теоретическая гипербола, соответствующая скорости 9.5 см/нс. Минимальное время отражения соответствует времени на пересечении чёрной и зелёной линий на рис.7.3 а. Далее из скоростей рассчитывалась глубина до отражающей границы, которая сверялась с проектными значениями. Результаты зондирования приведены в таблице 7.1. За выполненную работу кафедрой сейсмометрии и геоакустики была получена благодорность от «Росдорнии». Разработка методик анализа динамических характеристик волновых записей упругих волн Результаты этапа: 1. Проведены испытания технологичнски нового скважинного источника. 2. Выполнены каротажи скважин и межскважинные просвечи-

вания естественного разреза. 3. Выполнено сейсмоакустическое исследования скважин техногенно-изменённого разреза. 4. Выполнены наземные сейсмические наблюдения на поперечном типе волн. 5. Проанализирован потенциал применения отражённых волн в Межскважинном просвечивании на модельных и реальных данных. 6. Выполнен анализ динамических характеристик радарограмм различных типов естественного ландшафта. 7. Выполнено георадарное зондирование техногенного разреза.

По результатам выполнения этапа опубликовано 1 учебное пособие, 6 статей в научных журналах, 8 статей опубликовано в сборниках и сделано 14 докладов на конференциях. 1 января 2022 г.-31 декабря 2022 г. Разработка методик анализа динамических характеристик волновых записей упругих волн

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заключение Основные достигнутые в ходе выполнения 7 этапа НИР результаты можно сформулировать так: Раздел 1. В ходе испытания нового низкочастотного скважинного зонда были получены кондиционные данные, пригодные для анализа динамических характеристик. Частотная характеристика хорошая (косвенно) от 1 Гц. Для точный результатов анализа нужна четкая синхронизация начал записей на зонде и акселерометре, как опорной станции. Главные выявленные геологические границы – кровля глины и кровля известняка выражаются в записях очень резко. Причем, при создании мощного поля от механизма еще резче, но скорее всего здесь уже преобладают волны продольные. Распределение поля по глубине очень сильно зависит от геологии, что известно. Однако, для построения корреляционных связей между геологическими и сейсмическими характеристиками необходимо проведение дополнительных исследований. Общие кривые зависимости амплитуд гармоник в волне Релея в инженерных работах весьма далеки от моделей, применяющихся в методе MASW. Раздел 2. Каротажи скважин По данным каротажей на продольных волнах вся толща разбивается по глубине на 2 интервала : от поверхности и до отметки -8 м - высокий положительный градиент скорости, характерный для сухих сверху и водонасыщенных ниже УГВ песчано-глинистых пород. Ниже отметки -8 м скорость в среднем по скважинам нарастает плавно в соответствии с увеличением горного давления в песках. Особняком стоят скважина 3 и скважина 9. Особенно это заметно в интервале отметок «-5 м» - «-13 м». Здесь значения скоростей продольных волн на 200 -300м/с меньше, чем в среднем по другим скважинам. По данным каротажей на поперечных волнах внутри самой толщи мелких песков необходимо выделить интервал отметок «-5м» - «-13м». Разброс значений скорости на отметке -9м от 460 м/с до 640 м/с, то есть почти в 1,5 раза, что соответствует изменению значений динамического модуля сдвига в 2 раза. Для толщи песков это означает, что на этой глубине в скважинах 2, 5, 9 и 10 имеют место максимальные значения динамического модуля сдвига до 650 МПа, что превышает практически вдвое значения, характерные для водонасыщенного песка в естественном залегании. II.Межскважинные просвечивания Под глубинами прокладки коллектора располагается на всем протяжении его заложения зона грунтов с пониженными значениями скоростей распространения упругих продольных волн, ниже значений в 1600м/с на фоне более высоких значений скорости, что свидетельствует о понижении деформационных характеристик и разуплотнении этой области водонасыщенных песков. Раздел 3. Результаты сейсмоакустического исследования скважин, включающего в себя два вида каротажей и межскважинные просвечивания с последующим томографическим обращением, позволили определить пространственных границы пустот и полостей в забутовке вспомогательных подземных выработок метрополитена. Интервал обследования определялся доступностью ствола скважины для приборов в момент исследования. Имеющиеся в литературе и используемые в практике корреляционные связи между упругими характеристиками грунтов и их прочностными свойствами дали возможность произвести оценки прочностных свойств исследуемых грунтов. Раздел 4. По результатам анализа динамических характеристик разрезов МОВ ОГТ было определено фактическое положение коллектора. По результатам наземной

сейсморазведки было уточнено литологическое строение участка работ в межскважинном пространстве. По результатам наземной сейсморазведки на продольном типе волн было установлено положение уровня грунтовых вод на момент проведения работ. В перспективе подобные процессы могут привести к возникновению техногенной суффозии и небольшим просадкам в самом верхнем слое грунтов значительно выше самого коллектора. Раздел 5. В рамках данного этапа работы был обработан и проанализирован существенный объем модельных и реальных данных, полученных в ходе работ методом МСП. В среде программирования «Matlab» был реализован инструмент, позволяющий проводить полный цикл процедур в рамках данного метода, начиная от процесса ввода кинематических поправок, до получения итогового изображения среды в поле отраженных волн. Как было доказано на примере реальных данных, опыт применения метода МСП-ОГТ, полученный в рамках данной работы, может быть успешно использован на практике. Данный метод выступает значительным дополнением к традиционной сейсмической томографии в методе МСП. Раздел 6. Проведенные исследования показали, что динамические характеристики радарограмм позволяют выделять границы ландшафтов, обнаруживать погребённые формы рельефа, изучать внутреннюю структуру положительных форм рельефа, а также выявлять структуру таких сложных непрерывно меняющихся во времени и пространстве объектов, как галоклин. Показано, что существенный прирост информации даёт совмещение георадарных исследований с морфометрическим анализом форм рельефа и измерениями физических свойств на образцах. Раздел 7. В ходе зондирования дорожной были решены все поставленные задачи: выделены конструктивные слои, определены их толщины и скорости распространения электромагнитных волн в них.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2022 году
Таблица А.1

Источник финансирования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные средства в виде субсидии на выполнение фундаментальных научных исследований в соответствии с госзаданием МГУ, часть 2 (р. 01 10)	3 528 000,0	3 528 000,0