



АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСА СЕЙСМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ГЕОФИЗИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД В ОСНОВАНИИ ЗДАНИЯ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ

А.А. Заплавнова^{1,2,3}, В.В. Оленченко¹, П.А. Дергач^{1,2}, К.В. Федин¹, П.С. Осипова¹, А.Н. Шеин^{1,3}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

³ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики, 629008, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ,
Салехард, ул. Республики, 20, офис 203
e-mail: ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

В условиях городской застройки г. Салехарда опробован комплекс методов, включающий электротомографию (ЭТ), георадиолокацию (ГРЛ), сейсморазведку на преломленных волнах (МПВ), на поверхностных волнах (MASW) и с выделением стоячих волн для решения геокриологических задач и мониторинга состояния мерзлых пород в основании здания. В качестве эталонного объекта было выбрано жилое здание на свайном фундаменте, построенного по первому принципу строительства и оборудованного системой непрерывного геотермического мониторинга. Установлено, что методы ЭТ, МПВ и MASW неэффективны в условиях железобетонного свайного фундамента в ростверке и бетонной стяжки пола со слоем рыхлого насыпного грунта под ним. Лучший результат показали георадиолокация на частотах 150 и 400 МГц и сейсморазведка с выделением стоячих волн. Комплекс этих методов рекомендуется для определения положения кровли мерзлых пород под зданиями, определения фактической длины свай, качества их закрепления, оценки обводненности грунтов в окосвайном пространстве, оценке остаточного ресурса здания.

Многолетнемерзлые породы, геофизические методы, мониторинг, инженерная геофизика, свайный фундамент

APPROBATION OF SEISMIC AND ELECTRICAL GEOPHYSICAL TECHNIQUES COMPLEX FOR SOLVING THE PERMAFROST MONITORING PROBLEMS ON THE PILE-FOUNDATION BUILDING

A.A. Zaplavnova^{1,2,3}, V.V. Olenchenko¹, P.A. Dergach^{1,2}, K.V. Fedin¹, P.S. Osipova¹, A.N. Shein^{1,3}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Republic Str., 20, office 203,
Tyumen Region, Yamal-Nenets Autonomous District, 629008, Russia,
e-mail: ZaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

In the urban conditions in Salekhard city, a complex of methods, including electrical resistivity tomography (ERT), ground penetrating radar (GPR), a seismic survey on refracted waves (REF), on surface waves (MASW) and the standing waves selection, was tested on solving geocryological problems and monitor the permafrost at the building base. As a model object, a residential building on a pile foundation, built according to the principle I and equipped with a continuous geothermal

monitoring system, was chosen. It has been established that the ERT, REF, and MASW methods are ineffective in the conditions of a reinforced concrete pile foundation in a grillage and a concrete floor screed with a layer of loose bulk soil under it. The best result was shown by GPR at frequencies of 150 and 400 MHz and seismic exploration with the standing wave selection. A combination of these methods is recommended for determining the upper permafrost boundary under buildings, determining the actual piles-length, the quality of their fixing, assessing the water content of soils in the area around the piles, and establishing the residual building life.

Permafrost, geophysical techniques, monitoring, engineering geophysics, pile-foundation

ВВЕДЕНИЕ

Геофизические методы широко используются для решения задач инженерной геокриологии [Старовойтов, 2008; Зыков и др., 2010; Мельников и др., 2010], в том числе и для мониторинга состояния грунтов в основаниях зданий и инженерных сооружений [Румянцев, Сергеевцев, 2012; Ефремов, Дроздов, 2016]. В мировой практике показана эффективность применения геофизических методов для решения инженерных задач [McDowell et al., 2002; Капустин, 2008; Аузин, Зацепин, 2016; Колесников, Федин, 2016; Аузин, 2020]. Однако большинство исследований наземными геофизическими методами проводится на этапе проектирования работ, тогда как мониторинг состояния мерзлых грунтов выполняется преимущественно скважинной термометрией. Обычно количество термометрических скважин в пределах сооружения ограничено, в то время как с помощью наземных методов можно обеспечить достаточно высокую плотность сети наблюдений. Возникает необходимость выбора оптимального комплекса геофизических методов для изучения разреза и мониторинга состояния мерзлых пород в основании зданий, построенных по первому принципу строительства – с сохранением мерзлоты в основании.

Условия городской застройки накладывают некоторые ограничения на возможность применения тех или иных методов. Эти ограничения возникают из-за проблем с устройством заземлений для гальванических методов электроразведки, ограниченной геометрии пространства для обеспечения нужного расстояния между электродами или сейсмическими датчиками при зондированиях, присутствия рыхлого слоя насыпных грунтов, бетонной стяжки или асфальта. Следовательно, не все методы геофизики будут эффективно решать поставленные задачи.

Целью данной работы являлся выбор оптимального комплекса наземных геофизических методов для определения геокриологического строения и мониторинга состояния мерзлых пород в основании зданий и сооружений в условиях города Салехард.

Основными задачами было оценить информативность и трудоемкость методов при определении положения кровли мерзлых пород, выявления таликов, оценить чувствительность методов при изменении температуры мерзлых грунтов. Кроме этого изучалась информативность сейсморазведки с выделением стоячих волн для определения длины свай, добротности свай, оценки напряженно-деформированного состояния фундамента, конструкции здания и его изменения при оттаивании деятельного слоя и изменении температуры мерзлых пород.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Девятиэтажное жилое здание было построено по I принципу строительства, т. е. с сохранением многолетнемерзлых грунтов в основании. Высота проветриваемого подполья 1.5 м. Фундамент столбчатый (под колонны) и ленточный (под диафрагмы), монолитный железобетонный по сборным

сваям. Подполье закрыто металлическими заслонками по периметру здания. Основание залито армированной бетонной стяжкой, мощностью до 0.12 м.

Для сохранения ММП в основании по контуру здания и каждого свайного куста установлены сезонные охлаждающие устройства (СОУ). В результате термостабилизации вокруг кустов свай до глубины 10 м была сформирована многолетнемерзлая толща с максимальными температурами осенью около минус 1 °С и минимальными температурами до минус 5.4 °С.

В пределах проветриваемого подполья расположена сеть термометрических скважин глубиной 10–12 м в количестве 24 шт., обеспечивающая непрерывный температурный мониторинг.

Согласно результатам бурения, в геологическом строении площадки участвуют насыпной грунт (песок с гравием до 2 %) мощностью 0.7 м и песок пылеватый, до глубины 6.7 м – водонасыщенный, ниже – твердомерзлый, массивной криотекстуры. В интервале глубин 10.5–14.3 м – песок мелкий с гравием до 4 %, твердомерзлый, массивной криотекстуры. В интервале 14.3–15 – песок пылеватый, с гравием 2 %, твердомерзлый, массивной криотекстуры. В юго-западном углу здания одной из скважин с глубины 11.5 м под мерзлой толщей вскрыты обводненные пески.

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА

Для апробации были выбраны методы электротомографии, георадиолокации, многоканального анализа поверхностных волн (MASW), сейсмической томографии, сейсморазведки с выделением стоячих волн.

Исследования проводились в два этапа: в период максимального промерзания деятельного слоя (май) и период его максимального оттаивания (сентябрь).

Зондирования проводились по профилю, расположенному вдоль длинной оси здания (рис. 1). Дополнительные измерения методом георадиолокации были проведены в пределах термометрической аномалии, установленной по результатам скважинной термометрии.

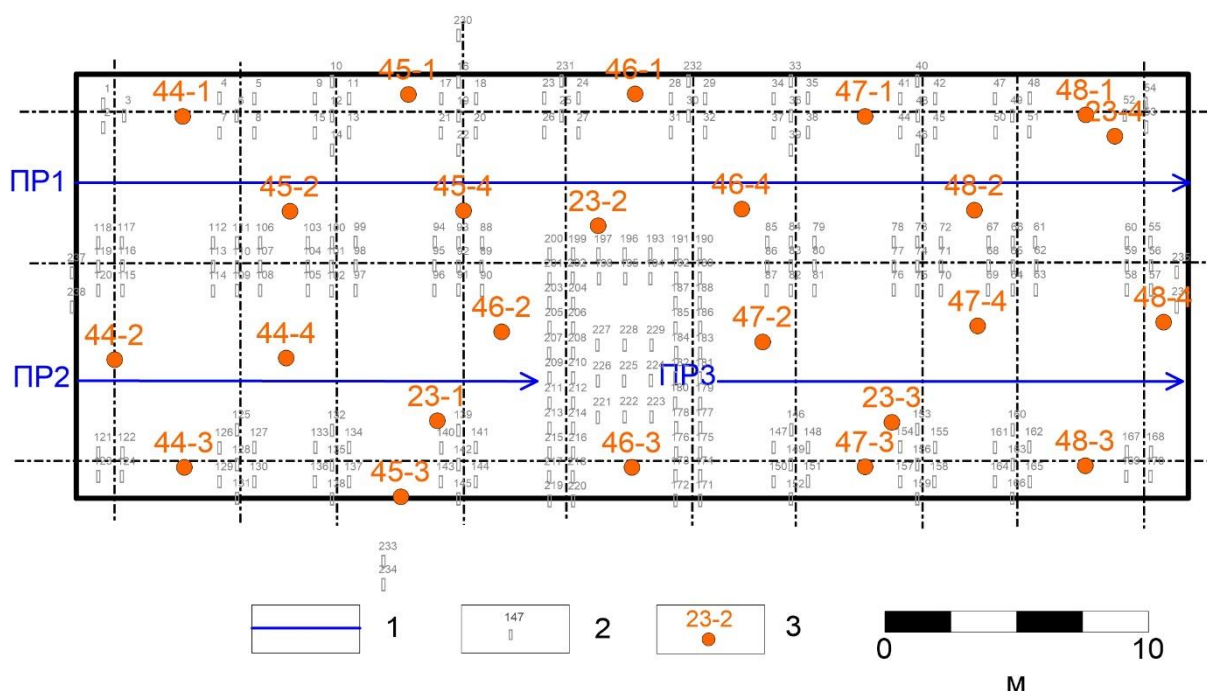


Рис. 1. Схема расположения профилей на плане здания, свайных кустов и термометрических скважин; 1 – измерительные профили, 2 – сваи фундамента, 3 – термометрические скважины

При измерениях методом георадиолокации применялся георадар ОКО-3 с антенными блоками центральной частоты 50, 150, 200 и 400 МГц. Для привязки измерений по расстоянию вдоль профиля использовался датчик перемещения. Контроль привязки производился по рулетке через каждые 5 м профиля. Обработка данных проводилась с помощью программы GeoScan32.

Электротомография выполнялась с помощью прибора «Скала 64-к15». Последовательность подключения электродов соответствовала установкам симметричной Веннера–Шлюмберже, дипольной и трехэлектродной прямой и встречной. Шаг между электродами составлял 2 м. Электроразведочный профиль выходил на придомовую территорию на 10 м с каждой стороны. Проблема заземления электродов на бетоне или асфальте была решена с помощью влажной ветоши, смоченной соленым раствором. Это позволило обеспечить пропускание тока через бетонную стяжку в подполье и железобетонные плиты дорожного покрытия, но на асфальтовом дорожном покрытии такая методика не сработала, т. к. асфальт – диэлектрик. Соппротивление заземления через ветошь составляло 0.5–1.5 кОм, но при высыхании ветоши резко возрастало. Поэтому после устройства заземлений проводился постоянный контроль влажности ветоши.

Обработка данных электротомографии проводилась с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv. По профилям строились геоэлектрические разрезы по результатам двумерной инверсии. Интерпретация данных проводилась с учетом результатов предшествующих инженерно-геологических изысканий и известных зависимостей УЭС от литологического состава пород, температуры и засоленности.

Сейсморазведочные исследования методами МПВ и MASW выполнялись бескабельной телеметрической сейсморегирующей системой «SCOUT», с регистрацией одной вертикальной (Z) компоненты смещения. Параметры записи: частота дискретизации – 1000 Гц; длительность – 500 мс; коэффициент усиления – 24 дБ.

Возбуждения волн производились посредством вертикальных ударов резиновой киянкой по бетонному основанию. Дополнительно использовался портативный вибрационный источник с частотным диапазоном излучаемого сигнала от 1 до 250 Гц. На каждом пункте возбуждения (ПВ) производилось от трех до пяти накоплений (в зависимости от взаимного расположения ПВ и ПП). Таким образом, одновременно регистрировались продольные и поверхностные волны. В качестве опорного сигнала использовался нелинейный СВИП с гиперболической разверткой по частоте от 1 до 100 Гц длительностью 60 с (low-dwell). Все сейсмические профили, за исключением двух, были расположены в пределах фундамента исследуемого здания. В отличие от работ, проводимых в июне, в сентябре два профиля выходили за пределы основания здания: один полностью и один частично.

Для исследования собственных колебаний свай зданий применялся метод, основанный на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов. Суть метода сводится к накоплению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на усредненных (или накопленных) спектрах появляются последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов. При этом для регистрации использовались горизонтальные и вертикальные геофоны GS20DX и трехканальные автономные цифровые регистраторы Байкал-АСН с частотой дискретизации 5 кГц. При анализе полученных экспериментальных данных сопоставлялись результаты математического моделирования методом конечных элементов [Рычков, 2004]. Регистрация шумов производилась на внешних стенах свай горизонтальными и вертикальными геофонами GS20DX и трехканальными автономными цифровыми регистраторами Байкал АСН, для наилучшего контакта в некоторых случаях датчик крепился жестким хомутом. Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдений

составляла 15 минут. Для повышения точности измерения длины свай параллельно проводились измерения прибором для определения длины свай Спектр 4.3. Измерения проводились для каждого скважинного куста фундамента, а также на крыше сооружения. Изгибные колебания здания были определены путем установки датчиков и регистрации колебаний на лестничных пролетах каждого этажа здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Георадиолокация

Несмотря на то что антенные блоки георадара ОКО-3 являются экранированными, на радарограммах проявляются различные помехи – отражения, затрудняющие выделение полезного сигнала. Виды регистрируемых волн-помех показаны на примере радарограммы, полученной антенной с центральной частотой 150 МГц (рис. 2). Основные помехи, возникающие в условиях подполья, относятся к воздушным волнам-помехам. Оси синфазности, имеющие прямолинейную форму (5, рис. 2), присутствуют на всех радарограммах, полученных в подполье. Эти помехи были вызваны отражением сигнала от металлических ограждений подполья в начале и в конце профиля. Серии гипербол дифракции (6, рис. 2) образованы отражениями электромагнитной волны от свайных кустов. Помехи в виде многократных высокоамплитудных отражений в виде вертикальных полос («звона») наблюдаются от приповерхностных объектов (7, рис. 2), таких как фрагменты арматуры или кабелей, встречающихся в бетонной стяжке здания.

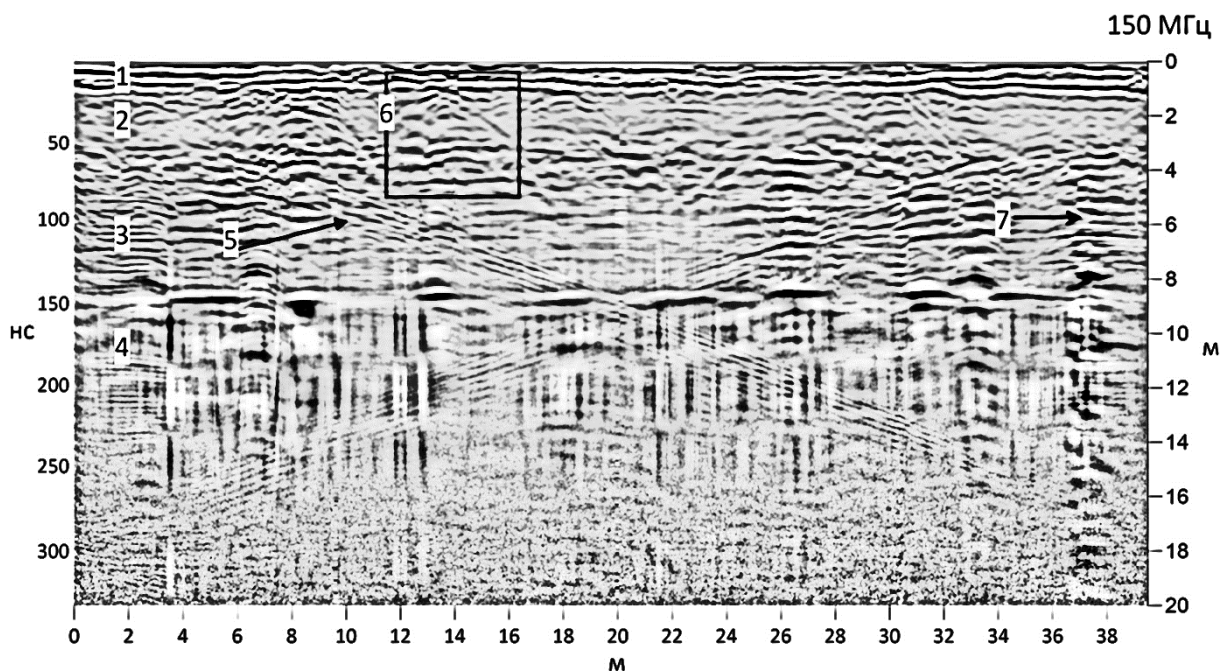


Рис. 2. Радарограмма по профилю № 1. Частота антенны 150 МГц: 1–4 – георадарные комплексы, 5 – воздушные отражения от щитов, закрывающих подполье, 6 – воздушные отражения от колонн, 7 – «звон» от приповерхностных объектов.

Оказалось, что при измерениях неэкранированной антенной частотой 50 МГц волны-помехи оказывают значительное влияние на волновую картину, что делает невозможной интерпретацию радарограмм. Впоследствии было принято решение отказаться от использования такой антенны из-за больших габаритов, зашумленных данных и низкой разрешающей способности.

При использовании для зондирования относительно высоких частот 250 и 400 МГц установлено, что сигналы затухают слишком быстро и не дают информацию о среде глубже 5 м. Однако эти антенны дают более детальные данные о строении верхней части разреза.

Сопоставление радарограмм 400 и 150 МГц с данными термометрии в июне и в сентябре 2022 г. показало, что кровля ММП может быть выделена по изменению характера георадиолокационного сигнала при переходе в мерзлые грунты. Результаты двух этапов работ показывают хорошую корреляцию температурных и радарных данных. Стоит отметить, что в юго-восточной части здания мощность сезонного слоя выше, чем в северо-западной (рис. 3, б). Данный факт дополнительно подтверждает возможности метода к выделению даже небольших изменений положения кровли ММП.

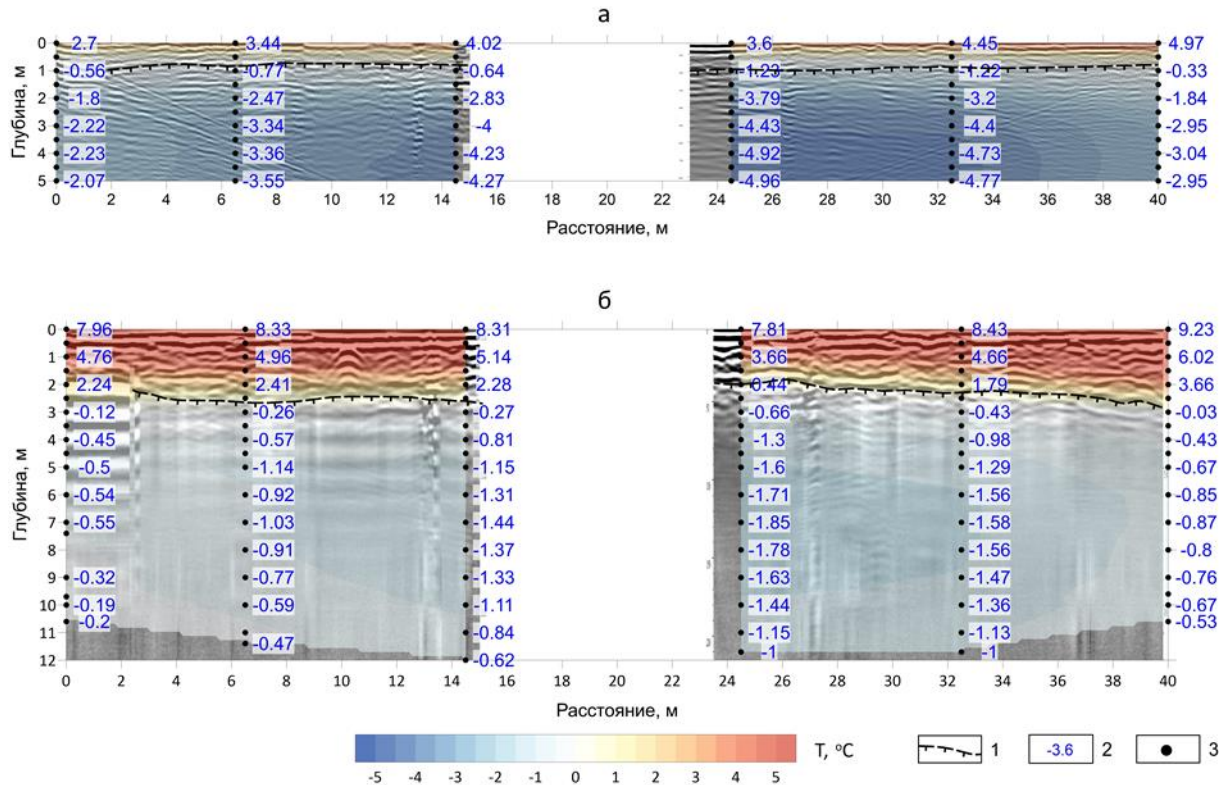


Рис. 3. Радарограммы по профилям 2 и 3 в июне на частоте 400 МГц (а) и в сентябре на частоте 150 МГц (б) совместно с температурным разрезом: 1 – кровля ММП, 2 – значения температуры, 3 – расположение термометрических датчиков

Для мониторинга положения кровли мерзлых пород рекомендуется использовать комплекс экранированных антенн 400 и 150 МГц. Применение комплекса этих антенн позволяет маркировать кровлю ММП как в период максимальной, так и минимальной мощности деятельного слоя. Измерения на частоте 150 МГц позволяют выделить литологические особенности под домом и на придомовой территории, на частоте 400 МГц обеспечивают детализацию верхней части разреза (до 5 м).

Электротомография

На разрезах удельного электрического сопротивления грунтов по данным 2D инверсии (рис. 4) с глубины около 4 м проявляется обширная аномалия очень низких значений (0.1–10 Ом·м). Эта аномалия не связана с геокриологическими и литологическими особенностями грунтов, а вызвана влиянием арматуры свай и железобетонного ростверка. Кроме этого, высокоомный слой в верхней части разреза

присутствует как в период максимального промерзания, так и в период максимального оттаивания деятельного слоя, что говорит о нечувствительности метода для оценки динамики сезонного промерзания грунтов под зданием. Вероятно, это связано с воздушно-сухим состоянием насыпного слоя, так как интенсивное проветривание подполья сквозняком, которое мы наблюдали в процессе работ, приводит к сильному иссушению верхней части разреза. Маловлажные грунты деятельного слоя имеют такое же высокое УЭС, как и в мерзлом состоянии, что не позволяет проследить границу оттаивания методом электротомографии.

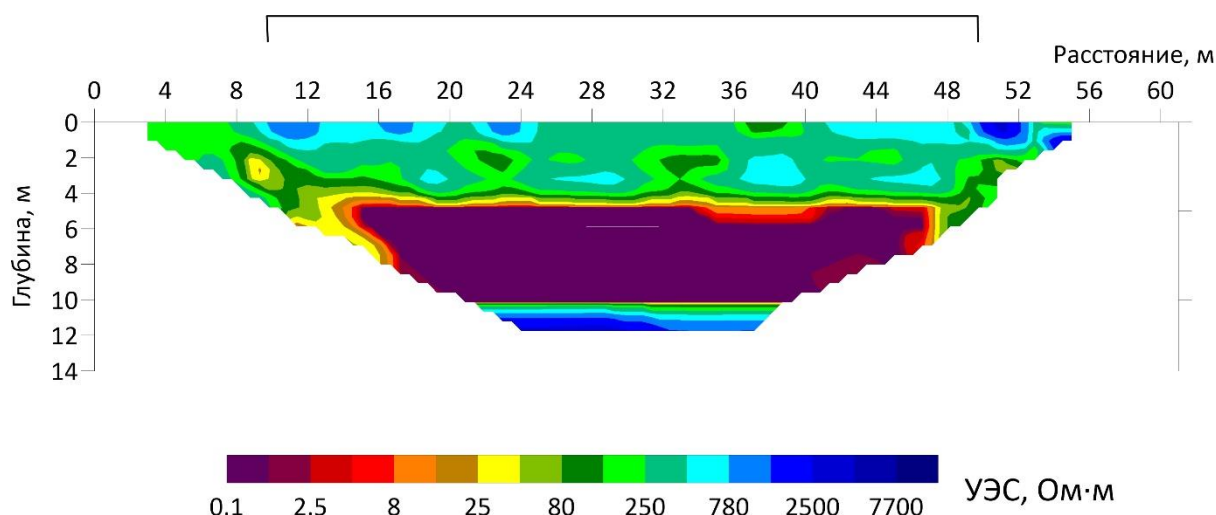


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю 1 дипольно-осевая установка; черной линией отмечены границы здания относительно профиля

Результаты трехмерной инверсии также не дали никакой геологической информации. В трехмерной модели распределения УЭС преобладала аномалия очень низкого электросопротивления, вызванная железобетонными сваями и ростверком. Сравнение моделей, полученных весной и осенью, показало несостоятельность метода ЭТ в трехмерной постановке обратной задачи для решения задач мониторинга.

Таким образом, из-за железобетонных конструкций и маловлажного грунта в верхней части разреза метод электротомографии оказался непригоден для оценки геокриологического строения разреза в основании здания и мониторинга состояния мерзлых пород.

Сейсморазведка методом преломленных волн

Полевые сейсмограммы анализировались на предмет возможности выделения времен прихода продольных (P) и поперечных (S) волн. На основе этого делалось заключение о наличии в разрезе инверсного слоя (с пониженной скоростью) и, соответственно, возможности обработки данных методом преломленных волн (в том числе сейсмической томографии).

Результаты анализа показали, что в разрезе присутствует инверсный слой. Наличие инверсионного слоя делает невозможным обработку построения скоростных разрезов методом преломленных волн (в том числе методом сейсмической томографии). Следовательно, метод МПВ непригоден для решения геокриологических задач и мониторинга состояния мерзлых пород в основании здания в данных условиях.

Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW)

Метод многоканального анализа поверхностных волн Релея (MASW) применялся для обработки сейсмограмм со всех профилей. Использовалась программная реализация метода MASW, основанная на применении алгоритмов SFK-преобразования [Serdyukov et al., 2019], оптимизации выбора параметризации скоростной модели и метода Монте-Карло [Yablokov et al., 2021].

На всех разрезах выделяется приповерхностный слой, характеризующийся пониженным значением скорости V_s около 200–300 м/с (рис. 5). Ниже, предположительно, залегает толща мерзлых пород, характеризующаяся значением скорости V_s около 1200 м/с. Мощность верхнего слоя сильно варьируется (от 1 до 5 м) как для данных полученных в июне, так и в сентябре.

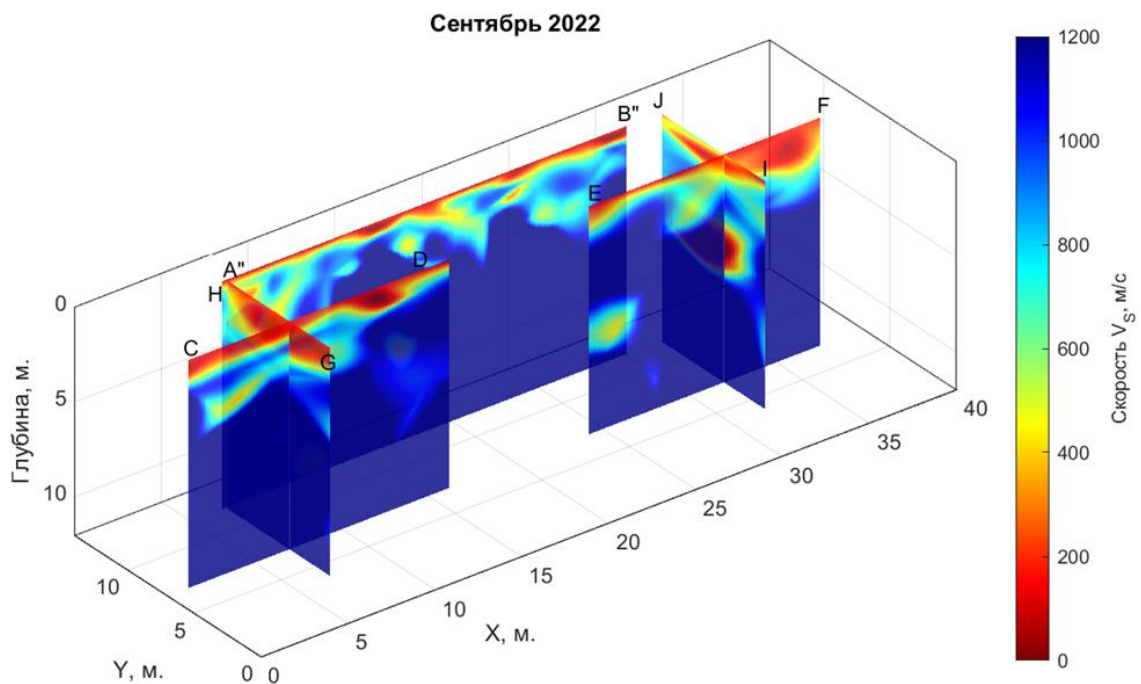


Рис. 5. Двумерные разрезы по MASW, полученные в результате интерполяции одномерных разрезов. Ограничение по глубине 12 м

Результаты, полученные в сентябре 2022 г., плохо согласуются с результатами предыдущих исследований методом MASW, проведенных в июне 2022 г. вдоль тех же профилей и с результатами других геофизических методов. Это, по всей видимости, связано с низким качеством данных, получаемых в пределах здания. Основная причина – наличие пустот между бетонной стяжкой пола подполья и насыпным грунтом. Опытные работы показали, что метод MASW также негоден для мониторинга мерзлого состояния пород в данных условиях.

Сейсморазведка методом стоячих волн

При обработке экспериментальных данных зарегистрированные в каждой свае шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно по 8.2 секунд (8192 отсчета), вычислялись амплитудные спектры этих фрагментов и проводилось их накопление. В результате на амплитудных спектрах появлялись резкие высокоамплитудные пики, которые в случае регистрации вертикальных компонент соответствовали модам типа сжатия–расширения.

Всего было обследовано 26 свай. На рисунке 6 числовыми значениями у свайных кустов показаны результаты определения длины свай по методике выделения стоячих волн прибором «Спектр 4.3», который применялся для верификации результатов. Расчеты длины свай по данным двух методов показали идентичные результаты.

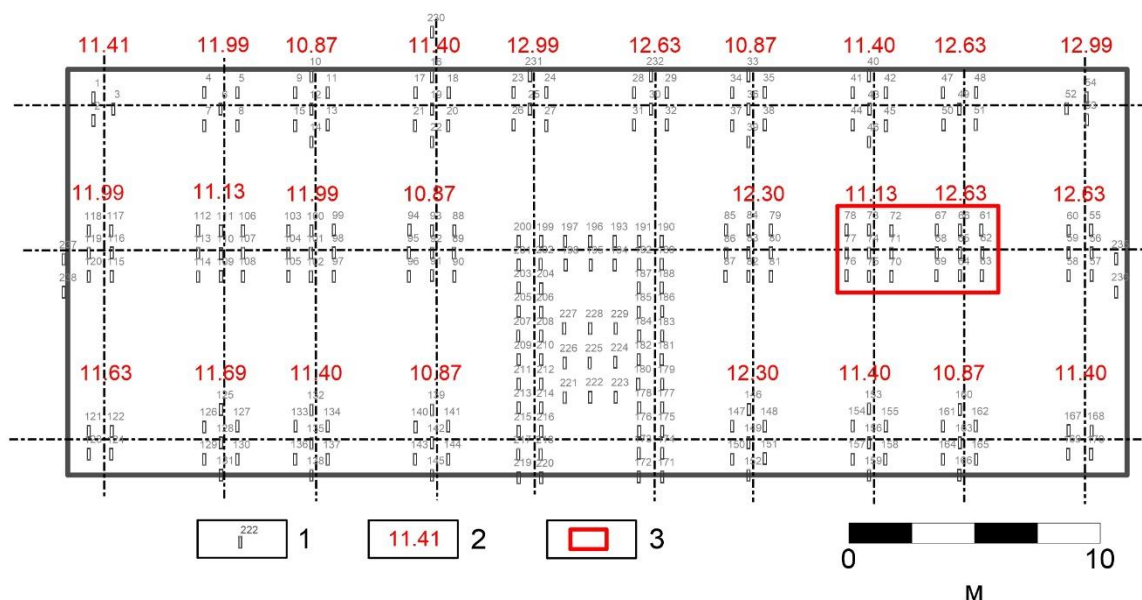


Рис. 6. Длины свай фундамента обследуемого жилого дома по данным метода сейсморазведки с выделением стоячих волн и измерителя длины свай аппаратурой «Спектр 4.3»: 1 – свая фундамента и ее номер, 2 – длина свай (в метрах) по данным сейсморазведки и акустических измерений, 3 – дефектные кусты свай по данным сейсморазведки с выделением стоячих волн

По результатам наблюдений в июне и сентябре 2022 г. были обнаружено две аномальные зоны амплитудного распределения колебаний первой моды (собственные частоты $X - 1.78$ Гц, $Y - 1.53$ Гц, $Z - 2.6$ Гц) в околосвайном пространстве, хорошо проявленные на всех трех компонентах и на картах распределения коэффициента Пуассона (отношение продольных колебаний к поперечным).

Первая аномальная зона располагается в правой части фундамента (рис. 7), проявляется повышением амплитуд колебаний. Детальный анализ измеренных сигналов показал, что на двух обвязках свай происходит отражение сигнала с глубины 8 м. Такой результат означает наличие дефекта на глубине отражения. Сопоставление измеренных данных с результатами математического моделирования подтвердили наличие и положение дефекта (предположительно, трещина или наклонное положение свай).

Вторая аномальная зона совпадает с положительной температурной аномалией по данным скважинной термометрии. Повышение амплитуд на карте распределения коэффициента Пуассона свидетельствует об обводненности участка в околосвайном пространстве и о глубинном источнике аномалии. Как можно видеть на рис. 7, размер аномальной зоны увеличился в сентябре, что связано с увеличением размера обводненного участка песков вследствие повышения температуры грунтов за летний период.

На крыше здания исследования с выделением стоячих волн не выявили аномальных зон, превышающих нормальные собственные колебания конструкции. По изгибным модам колебаний был определен остаточный ресурс сооружения, согласно ГОСТ 34081-2017, который составил на момент исследований 100 %.

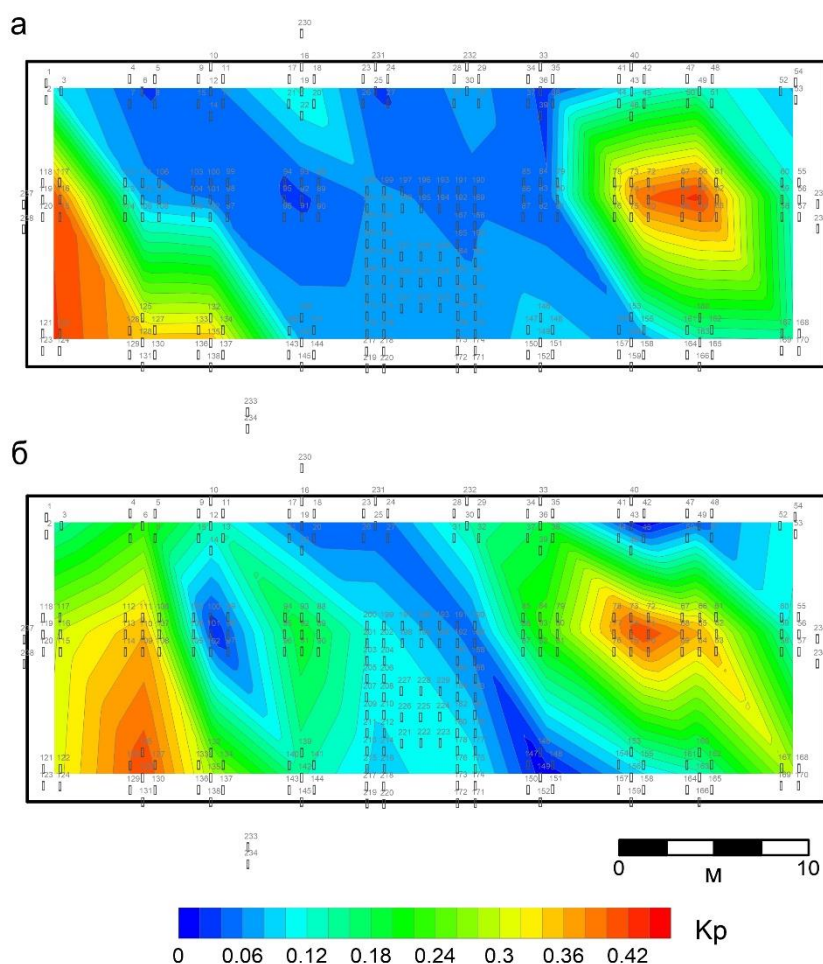


Рис. 7. Карта распределения коэффициента Пуассона в околосвайном пространстве в июне (а) и в сентябре (б)

Полученные экспериментальные результаты показали, что для обнаружения потери устойчивости свай нужно применять метод стоячих волн по спектрам шумовых сигналов. Из микросейсмических колебаний извлекаются сведения о распределении коэффициента Пуассона, которые необходимо использовать для выявления зон повышенной обводненности околосвайного пространства.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ

На данных георадиолокации хорошо выделяются литологические границы верхней части разреза и кровля сезонно- и многолетнемерзлых пород. Граница, проявляющаяся на глубине 2.5 м, по данным бурения является переходом от насыпных грунтов к суглинистым породам (рис. 8). По результатам метода MASW на глубине около 2.5 м происходит изменение характера волновой картины. Граница № 3 на глубине 8 м, связанная с изменением литологического состава пород (слой суглинков), была выделена только методом георадиолокации и MASW (при условии, что профиль выходит за пределы подполья).

На плане распределения коэффициента Пуассона (отношение продольных колебаний к поперечным) в области тепловой аномалии наблюдается интенсивная положительная аномалия (рис. 7). Такой результат свидетельствует о повышении обводненности грунтов в пределах аномальной зоны при нагревании грунтов в период максимального оттаивания и неработающих СОУ. Однако вариации температуры и влажности грунтов не проявляются на разрезах УЭС на фоне низкоомной аномалии, возникающей из-за влияния железобетонных свай и ростверка. Следовательно, для мониторинга

состояния мерзлых грунтов целесообразно использовать метод сейсморазведки с выделением стоячих волн и расчета коэффициента Пуассона (K_p). При повышении температуры мерзлых грунтов увеличивается количество незамерзшей воды в порах, особенно в тонкодисперсных и засоленных грунтах, что сказывается на величине K_p . В нашем случае преимущества этого метода перед методами МПВ и MASW заключаются в малых временных затратах и высокой информативности. Другие методы сейсморазведки не работают в случае присутствия бетонной стяжки пола и рыхлых насыпных грунтов под ней.

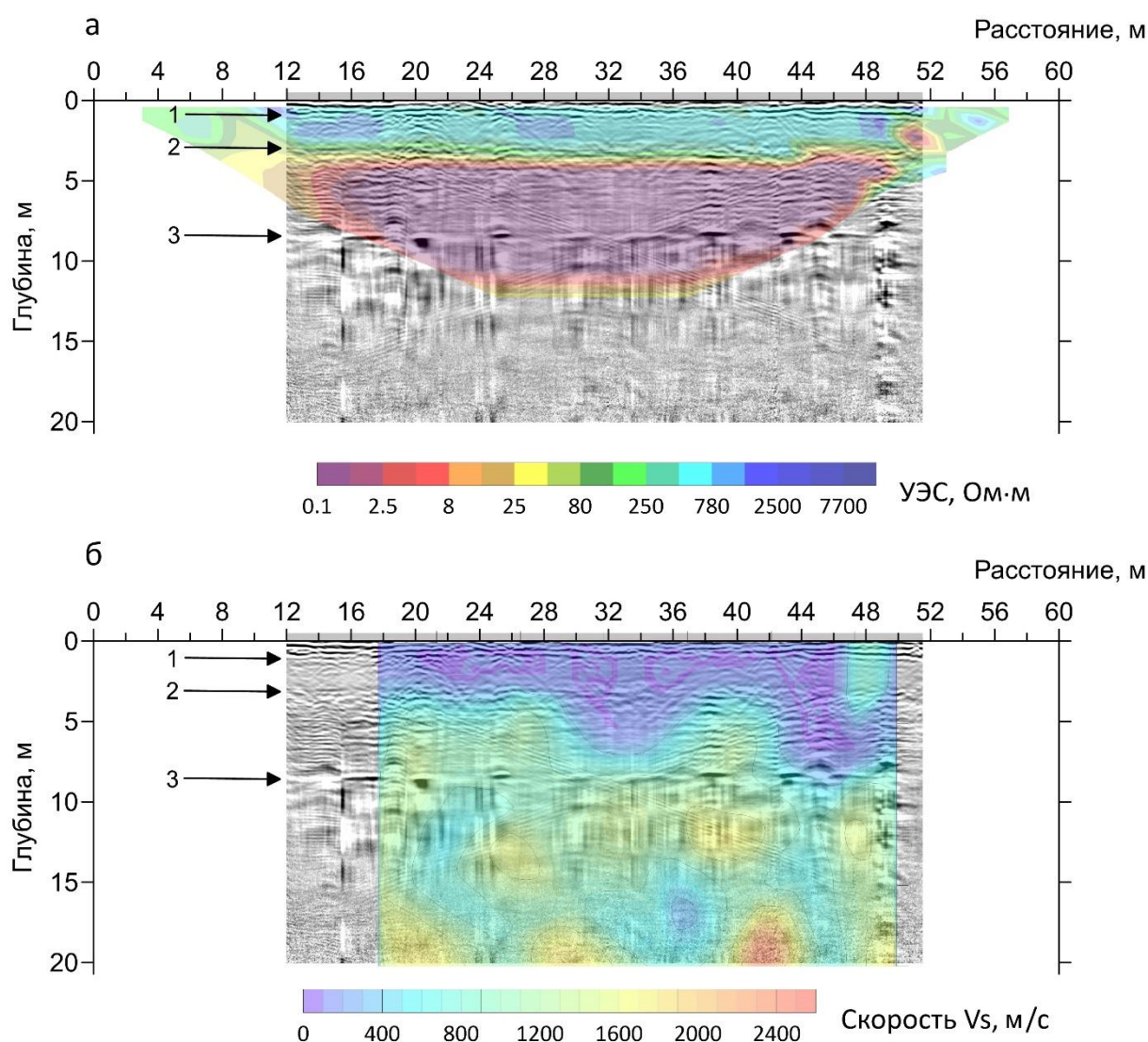


Рис. 8. Сопоставление георадарных данных на частоте 150 МГц с разрезом УЭС по данным ЭТ (а) и MASW (б). Цифрами показаны отражающие границы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг состояния мерзлых пород в основании зданий и сооружений является важной задачей, которая в настоящее время решается преимущественно с помощью термометрии по редкой сети скважин. Казалось бы, наземные геофизические методы способны дополнить информацию о состоянии мерзлых

пород под зданиями, однако их применение в условиях городской застройки и железобетонной конструкции здания имеет ряд особенностей.

Как показали наши исследования, такими особенностями являются наличие бетонной стяжки пола в проветриваемом подполье, железобетонные кусты свай, объединенные в ростверк, ограниченное пространство. Все эти факторы осложняют применение электротомографии, сейсморазведки МПВ и MASW для решения таких задач как определение глубины залегания кровли мерзлых пород, выявление таликов, мониторинг состояния мерзлых грунтов.

Задача выделения кровли ММП была решена только методом георадиолокации. Измерения методом ГРЛ весьма эффективны и позволили выделить даже такие небольшие эффекты, как изменение глубины сезонного оттаивания в зависимости от экспозиции стороны здания. С юго-восточной стороны здания глубина сезонного оттаивания на 0.5 м больше, чем с северо-западной.

На основе опытных работ для проведения сезонного мониторинга положения кровли ММП предлагается оптимальный комплекс антенных блоков, включающий экранированные антенны центральной частоты 150 и 400 МГц. Эти антенны показали лучшую разрешающую способность и помехозащищенность. Однако глубинность метода ограничена несколькими метрами.

Особенностями использования для этой задачи методов сейсморазведки связано с поверхностными условиями в подполье – бетонная стяжка и слой рыхлых насыпных грунтов. Такие поверхностные условия исключают применение методов КМПВ или MASW для неразрушающего контроля сооружений. Метод электротомографии также показал низкую эффективность для решения задач выделения кровли ММП, оконтуривания таликов и мерзлых пород. Причиной этому – металлическая арматура железобетонных свай, замкнутая в ростверке, которая создает интенсивную аномалию низкого УЭС на разрезах. На фоне этой аномалии невозможно выделить изменения в разрезе, связанные с динамикой геокриологических условий.

Полученные экспериментальные результаты показали, что для обнаружения потери устойчивости свай может с успехом применяться метод стоячих волн, которые выделяются из большого числа амплитудных спектров шумовых сигналов.

Анализ распределения напряженно-деформированного состояния фундамента и коэффициента Пуассона грунтов околосвайного пространства показал, что существуют две аномальные зоны: предполагаемый талик в северо-западном углу здания и две, предположительно дефектные, группы свай. У этих свай было зарегистрировано отражение сигнала с глубины 8 м, что, вероятно, соответствует наличию дефекта на этой глубине. Предполагается, что указанные сваи имеют меньшую длину, чем остальные сваи фундамента. Анализ мод изгибных колебаний показал, что общее закрепление свайного фундамента в грунте оценивается как хорошее, остаточный ресурс здания 100 %.

По результатам проведенных исследований рекомендуется применение комплекса георадиолокации и сейсморазведки с выделением стоячих волн для мониторинга состояния ММП и устойчивости зданий, построенных по I принципу строительства.

Работа выполнена при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) № FWZZ-2022-0024.

ЛИТЕРАТУРА

Аузин А.А., Зацепин С.А. Определение геометрических характеристик свайных конструкций геофизическими методами // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических

полей: Материалы 43 сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. – Воронеж, ООО ИПЦ «Научная книга», 2016. – С. 24–27.

Аузин А.А. Обследование фундаментов инженерных сооружений геофизическими методами // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 47 сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. – Воронеж, ООО ИПЦ «Научная книга», 2020. – С. 25–28.

Ефремов В.Н., Дроздов А.В. Изменения геокриологического состояния насыпных ГТС в Западной Якутии и оптимизация их мониторинга комплексом электроразведочных методов геофизики // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2016. – № 3 (83). – С. 36–42.

Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., Погорелов А.А., Сизых Е.М., Бек Д.Д., Усов А.М., Лучко М.В., Просунцов К.С., Скобелев А.Д., Смагин М.К. Роль и место электромагнитных зондирований при решении геокриологических задач // Первая международная научно-практическая конференция по электромагнитным исследованиям «Геобайкал–2010». – Иркутск, 2010. – 2 с.

Капустин В.В. Разработка способов комплексных геофизических исследований грунтов, геотехнических и строительных конструкций: автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. – М.: МГУ, 2008. – 25 с.

Колесников Ю.И., Федин К.В. Применение пассивного метода стоячих волн в инженерной сейсмике: физическое моделирование и натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 83–91.

Мельников В.П., Скворцова А.Г., Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Дубровин В.А. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов // Геология и геофизика. – 2010. – № 51 (1). – С. 171–180.

Румянцев А.А., Сергеевцев Е.Ю. Вибрационные испытания 16-этажного жилого дома объемно-блочной конструкции // Вестник МГСУ. – 2012. – № 5. – С. 98–102.

Рычков С.П. MSC.visual NASTRAN для Windows. – М.: HT Пресс, 2004. – 552 с.

Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 12. – С. 46–48.

McDowell P.W., Barker R., Butcher A.P., Culshaw M.G., Jackson P.D., McCann D.M., Skip B.P., Matthews S.L., Arthur J.C.R. Geophysics in engineering investigations. – Ciria, London, 2002. – 266 p.

Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics. – 2019. – Vol. 84 (1) – P. 19–24, doi: 10.1190/geo2018-0430.1.

Yablokov A.V., Serdyukov A.S., Loginov G.N., Baranov V.D. An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // Geophysical Prospecting. – 2021. – Vol. 69 (7). – P.1405–1432, doi: 10.1111/1365-2478.13107.

REFERENCES

Auzin A.A., Zatzepin S.A. Determination of the geometric characteristics of pile structures by geophysical methods // Proceedings of the 43th session “Problems of Theory and Practice in Geological Interpretation of Geophysical Fields” [in Russian]. – Voronezh, Nauchnaya Kniga, 2016. – P. 24–27.

Auzin A.A. Survey of the foundations of engineering structures by geophysical methods // Proceedings of the 47th session “Problems of Theory and Practice in Geological Interpretation of Geophysical Fields” [in Russian]. – Voronezh, Nauchnaya Kniga, 2020. – P. 25–28.

- Efremov V.N., Drozdov A.V.** Changes in the geocryological state of bulk hydraulic structures in Western Yakutia and optimization of their monitoring by a complex of electrical exploration methods of geophysics // Natural Resources of the Arctic and Subarctic. – 2016. – Vol. 3 (83). – P. 36–42.
- Kapustin V.V.** Development of methods for complex geophysical studies of soils, geotechnical and building structures. PhD Thesis [in Russian]. – MGU, Moscow, 2008. – 26 p.
- Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.** Application of passive standing wave method in engineering seismics: physical modelling and field experiment // Seismic Technologies. – 2016. – Vol. 2. – P. 83–91.
- Melnikov V.P., Skvortsov A.G., Malkova G.V., Drozdov D.S., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Tsarev A.M., Dubrovin V.A.** Results of studying the geocryological conditions of the Arctic territories using seismic methods // Russian Geology and Geophysics. – 2010. – Vol. 51 (1). – P. 136–142, doi: 10.1016/j.rgg.2009.12.011.
- Rumyantsev A.A., Sergeevtsev E.Yu.** Vibration tests of a 16-storey residential building of a volume-block design // Vestnik MGSU. – 2012. – Vol. 5. – P. 98–102.
- Rychkov S.P.** MSC.visual NASTRAN for Windows [in Russian]. – NT Press, Moscow, 2004. – 552 p.
- Starovoitov A.V.** Interpretation of georadar data // Exploration and protection of mineral resources. – 2008. – Vol. 12. – P. 46–48.
- McDowell P.W., Barker R., Butcher A.P., Culshaw M.G., Jackson P.D., McCann D.M., Skip B.P., Matthews S.L., Arthur J.C.R.** Geophysics in engineering investigations. – Ciria, London, 2002. – 266 p.
- Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D.** Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics. – 2019. – Vol. 84 (1) – P. 19–24, doi: 10.1190/geo2018-0430.1.
- Yablokov A.V., Serdyukov A.S., Loginov G.N., Baranov V.D.** An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // Geophysical Prospecting. – 2021. – Vol. 69 (7). – P.1405–1432, doi: 10.1111/1365-2478.13107.
- Zykov Yu.D., Koshurnikov A.V., Pogorelov A.A., Sizykh E.M., Bek D.D., Usov A.M., Luchko M.V., Prosuntsov K.S., Skobelev A.D., Smagin M.K.** Role and place of electromagnetic sounding in solving geocryological problems // Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference “GeoBaikal 2010” [in Russian]. – Irkutsk, 2010. – 2 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЗАПЛАВНОВА Анна Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: инженерная и рудная геофизика, криолитозона, комплексирование геоэлектрических методов, электротомография, магнитотеллурическое зондирование.

ОЛЕНЧЕНКО Владимир Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: применение электроразведочных методов геофизики при решении инженерно-геологических, рудопоисковых, геокриологических, геотехнических задач, поисках месторождений углеводородов и интерпретация электроразведочных данных.

ФЕДИН Константин Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: применение пассивной и активной сейсмологии для

решения инженерных задач, комплексирование с другими геофизическими методами для получения более точного результата.

ДЕРГАЧ Петр Александрович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморазведка.

ОСИПОВА Полина Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: удельное электрическое сопротивление, электротомография, россыпное золото, георадиолокация, вызванная поляризация, криолитозона, инженерная и рудная геофизика.

ШЕИН Александр Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация.