

# Исследование скважинного сейсмоакустического контроля методом МСП для оценки сплошности ледогрунтового ограждения

К. А. Дорохин, О. В. Бойко, А. М. Сухарев

АО «Ленметрогипротранс»

Российская Федерация, 191002, Санкт-Петербург, ул. Большая Московская, 2

**Для цитирования:** Дорохин, К. А., Бойко, О. В., Сухарев, А. М. (2024). Исследование скважинного сейсмоакустического контроля методом МСП для оценки сплошности ледогрунтового ограждения. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 321–332. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.206>

Искусственное замораживание грунтов довольно часто применяется в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях строительства подземных сооружений. В связи с тем, что работы по замораживанию грунтов являются скрытыми, необходим оперативный контроль сплошности возводимого ледогрунтового ограждения. Такой контроль традиционно осуществляется с помощью скважинной термометрии и гидрогеологических наблюдений. В статье рассмотрены возможности сейсмоакустического метода в варианте межскважинной томографии для контроля сплошности ледогрунтового ограждения в условиях сильно водонасыщенных грунтов. Основной предпосылкой использования сейсмических методов для контроля формирования ледогрунтового ограждения является заметная разница в значениях скоростей распространения сейсмических колебаний в грунтах, находящихся в естественных условиях, и грунтах, находящихся при отрицательных температурах. Исследования производились через те же скважины, через которые производится закачка хладагента. Конфигурация производства работ осуществлялась таким образом, чтоб для каждого положения приемной косы источник перемещался вдоль соседней скважины параллельно приемной скважине с выносами, равными половине длины приемной косы, после чего коса смещалась на следующее положение и процесс повторялся. Контроль проводился в два этапа — до активной фазы замораживания и после формирования ледогрунтового ограждения. В результате выполненных работ было установлено, что методом межскважинного сейсмоакустического просвечивания (МСП) возможно эффективно оценивать сплошность создаваемого ледогрунтового ограждения, а также могут быть выделены локальные участки, в которых процесс замораживания оказался недостаточным. Параметры, полученные методом межскважинной сейсмоакустической томографии, необходимы также для уточнения технологического режима по замораживанию грунтов.

**Ключевые слова:** ледогрунтовое ограждение, межскважинная томография, контроль сплошности.

## 1. Введение

Развитие мегаполисов в настоящее время неминуемо связано с освоением подземного пространства для устройства транспортных коммуникаций, подземных паркингов, торговых зон и прочих объектов городской инфраструктуры. При

реализации проектов, связанных с подземным строительством, всегда возрастает риск возникновения аварийных ситуаций, обусловленных как геологическими, так и антропогенными факторами.

Возможность снижения риска возникновения аварий при строительстве подземных сооружений появляется только при условии своевременного выявления неблагоприятных инженерно-геологических условий и процессов принятия и рационального применения эффективных проектных решений (Улицкий, 2010; Петрухин, 2010; Архипов, 2015).

Подземное строительство в условиях сильно водонасыщенных грунтов и плывунов существенно осложнено и зачастую начинается только после мероприятий по искусственному замораживанию грунтов, которое, в свою очередь, производится с целью создания водонепроницаемых и несущих ледогрунтовых ограждений (массивов). Данные мероприятия практически не имеют конкуренции при строительстве шахтных стволов и наклонных ходов метро (Безродный и Лебедев, 2021).

В настоящее время при подземном строительстве распространены два способа искусственного замораживания грунтов, которые можно разделить на рассольный и безрассольный.

Рассольное замораживание грунтов, а в рамках данной статьи речь пойдет именно об этом способе заморозки, реализуется следующим образом: бурением скважин по контуру будущего ограждения, устройством в скважинах замораживающих колонок, монтажом на площадке прямого и обратного коллекторов и холодильного оборудования, циркулирующей в замораживающих колонках холодоносителя с температурой до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до образования сплошного замкнутого ледогрунтового контура.

Создание ледогрунтового ограждения и поддержание его в работоспособном состоянии во время проходки является непростой задачей из-за сложности технологического процесса и существования причин, влияющих на замораживание грунтов. Основными неблагоприятными факторами для формирования ледогрунтового ограждения являются: расхождение трасс замораживающих скважин, движение грунтовых вод, недостаточная холодопроизводительность холодильного оборудования, а также человеческий фактор (Трупаков, 1974; Тютюник, 1994; Тютюник и Солодов, 1991; Хакимов, 1957). В связи с этим мероприятия по замораживанию грунтового массива необходимо проводить под инструментальным контролем эффективности, который, согласно ВСН 189-78 «Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей», выполняется путем гидрогеологических и термометрических наблюдений, осуществляемых в специально оборудованных скважинах в зоне замораживаемых грунтов. При этом рекомендуемые нормативным документом способы контроля не дают полной картины замкнутости созданного ледогрунтового ограждения и не позволяют выделить локальные области, в которых сплошность еще не сформировалась. Между тем данную задачу можно эффективно и оперативно выполнить с помощью скважинных сейсмоакустических исследований.

Исследованиями в области контроля процессов замораживания, в том числе с помощью сейсмоакустических и ультразвуковых методов, занимались такие ученые и исследователи, как П. М. Тютюник, А. М. Солодов, Н. Г. Трупаков, С. С. Вялов, Х. Р. Хакимов, А. Г. Архипов. При этом, несмотря на ценный опыт, полученный

авторами, сейсмические исследования не проводились в варианте сейсмической томографии, применение которой существенно повышает разрешающую способность метода, что важно для выделения локальных участков небольших размеров как в плане, так и по глубине.

## 2. Обоснование применимости метода сейсмоакустических исследований

Преимущество применения сейсмических методов для решения данной задачи объясняется прежде всего экономической эффективностью, мобильностью, скоростью выполнения, а главное, наличием высоких корреляционных связей между скоростью распространения сейсмических волн и переходом грунтов в мерзлое состояние (Вялов, 1959).

Главной физической предпосылкой использования сейсмических методов для контроля формирования ледогрунтового ограждения является заметная разница в значениях скоростей распространения сейсмических колебаний в грунтах, находящихся в естественных условиях, и грунтах, находящихся при отрицательных температурах (Горяинов и Ляховицкий, 1979).

Таблица 1. Скорости упругих волн в некоторых породах верхней части разреза (по данным (Горяинов и Ляховицкий, 1979))

Породы	Состояние породы	Скорость продольной волны ( $V_p$ , м/с)
Обломочно-песчаные: галечники	неводонасыщенное	400–800
	водонасыщенное	2000–2700
	мерзлое ( $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	3800–4800
пески	неводонасыщенное	200–500
	водонасыщенное	1500–2000
	мерзлое ( $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	3400–4000
Глинистые: супеси	неводонасыщенное	250–550
	водонасыщенное	1450–1800
	мерзлое ( $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	2800–3500
суглинки	неводонасыщенное	300–600
	водонасыщенное	1500–1900
	мерзлое ( $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	2200–2800
глины	неводонасыщенное	400–1800
	водонасыщенное	1800–2500
	мерзлое ( $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	1900–2300

В качестве примера в табл. 1 примеры значений скоростей упругих волн в некоторых породах в естественных условиях и в мерзлом состоянии. Исходя из данных, приведенных в таблице, можно отметить, что скорость сейсмических волн в замороженных грунтах существенно выше, чем в незамороженных. Таким образом,

оценку сплошности формирования ледогрунтового ограждения в первом приближении можно сделать по изменению скоростных характеристик. При этом области, в которых по каким-либо причинам грунт оказался не проморожен, будут выделяться пониженным или нулевым приростом скорости.

### 3. Методика проведения исследований и аппаратура

Задача по оценке сплошности ледогрунтового ограждения с учетом необходимой глубинности и детальности прогноза успешно решается с помощью скважинных сейсмоакустических исследований в варианте межскважинного сейсмоакустического просвечивания (МСП), которое эффективно применяется для оценки структурных и физико-механических характеристик исследуемой среды. Данный метод также имеет высокую эффективность при исследованиях грунтоцементных массивов, различных инженерных сооружений (типа «стена в грунте», «геотехнический барьер» и пр.), а также при мониторинговых режимных наблюдениях грунтового массива для оценки качества инъекционных и компенсационных работ, направленных на увеличение его прочностных характеристик (Улицкий и др., 2010; Петрухин, 2010; Безродный и Лебедев, 2021; Болгаров и Рослов, 2009; Исаев и др., 2021).

Стоит отметить, что скважинные исследования (рис. 1) имеют ряд преимуществ перед поверхностными методами:

- нет ограничений по глубине наблюдений (глубина исследований определяется глубиной скважин), что позволяет производить исследования на больших глубинах, даже в стесненных городских условиях, на полную глубину производства замораживания (Hamid, 2017);

- отмечается высокая разрешающая способность наблюдений в связи с приближением источников и приемников к среде исследования на всей ее протяженности и с отсутствием необходимости регистрации волн через неоднородный поглощающий поверхностный слой (Шишкина и др., 2015; Шишкина и др., 2014; Dobroka and Szegedi, 2014).

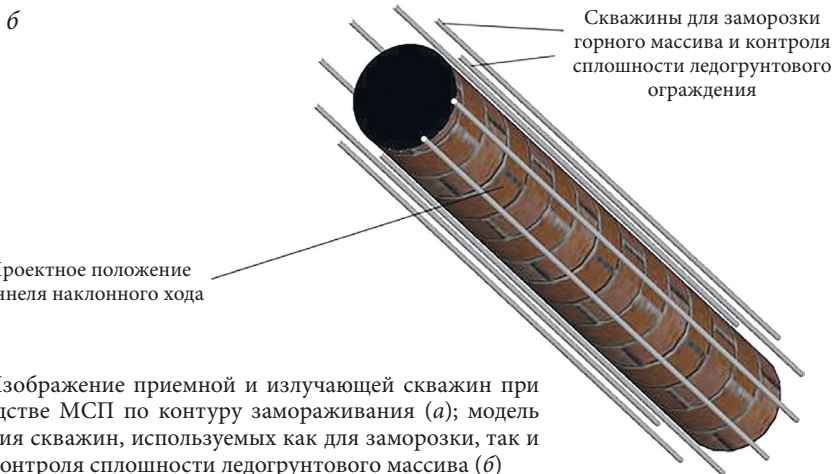
Также данный метод имеет некоторые ограничения:

- необходимо набурить скважины на всю глубину изучаемого объекта, что не всегда возможно осуществить из-за технических особенностей или финансовой нецелесообразности;

- качество данных напрямую зависит от материала обсадной колонны, например при использовании стальных труб усложняется обработка сейсмических записей из-за искажающего влияния колонны трубы, по которой с высокой скоростью распространяются акустические волны (Ошкин и др., 2016).

Контрольные исследования для оценки сплошности ледогрунтового ограждения производятся после завершения активной фазы замораживания с использованием замораживающих скважин, наполненных рассолом. В данные скважины для измерений опускаются скважинные зонды. Для производства МСП выбираются скважины с приблизительно равным интервалом (4–5 м) (рис. 1).

При производстве исследований методом МСП мы получаем томографическое сечение на всю глубину изучаемой среды для каждой пары скважин. В одну из рассолонаполненных скважин опускается приемная коса, а в другую — погружается электроискровой источник (рис. 2, а).



*Рис. 1.* Изображение приемной и излучающей скважин при производстве МСП по контуру замораживания (*a*); модель положения скважин, используемых как для заморозки, так и для контроля сплошности ледогрунтового массива (*б*)

Исследования производятся в следующей последовательности: для каждого положения приемной косы источник перемещается вдоль соседней скважины параллельно приемной скважине с выносами, равными половине расстановки, после чего приемная коса смещается на следующее положение и процесс повторяется (рис. 2, б) (Kubota et al., 2015).

Геофизический контроль выполняется в два этапа. Первый — до начала активной фазы замораживания для идентификации структуры исследуемой среды и оценки ее кинематических характеристик в естественном состоянии. Второй этап производится после завершения активной фазы замораживания для оценки эффективности замораживающих мероприятий и выделения областей, в которых сплошность ледогрунтового ограждения не обеспечена.

Обработка проводится с использованием программ Pickwin и Plotrefa, в среднем по 4–5 итераций и допустимой ошибкой не более 0,1 мс. Начальной моделью выбирается слоистая неоднородная среда.

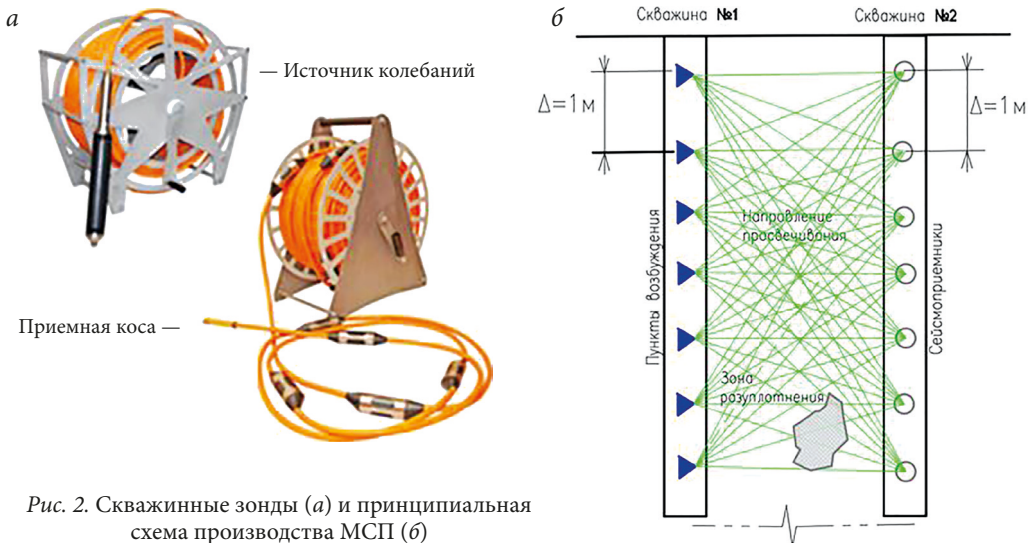


Рис. 2. Скважинные зонды (а) и принципиальная схема производства МСП (б)

Предел разрешающей способности метода принимается как диаметр первой зоны Френеля:

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda L},$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $L$  — длина луча. Принимая в качестве длины луча расстояние между скважинами, получим:  $d \approx 0,9 \text{ м}$ . Таким образом, данным методом можно локализовать скоростные аномалии размером более  $0,9 \text{ м}$ .

#### 4. Результаты, полученные на объекте строительства наклонного хода с превентивными мероприятиями по замораживанию грунтового массива

Ниже представлены результаты, полученные на реальном объекте при возведении ледогрунтового ограждения при строительстве наклонного хода станции метрополитена в Санкт-Петербурге. Геологические условия, в которых ведется строительство, показаны на рис. 3.

Грунты по разрезу представлены насыпными грунтами, супесями, суглинками с включениями гравия и гальки, глинами различной консистенции. На разрезе встречается слой водонасыщенных кварцевых песчаников от низкой до средней прочности.

Для оценки сплошности ледогрунтового ограждения были проведены скважинные исследования по методике МСП после завершения активной фазы замораживания. Скважины для производства контрольных измерений выбирались согласно схеме, изображенной на рис. 4.

В результате исследований были получены сейсмограммы (рис. 5), и по ним построены сейсмотомографические разрезы (рис. 6), представляющие состояние

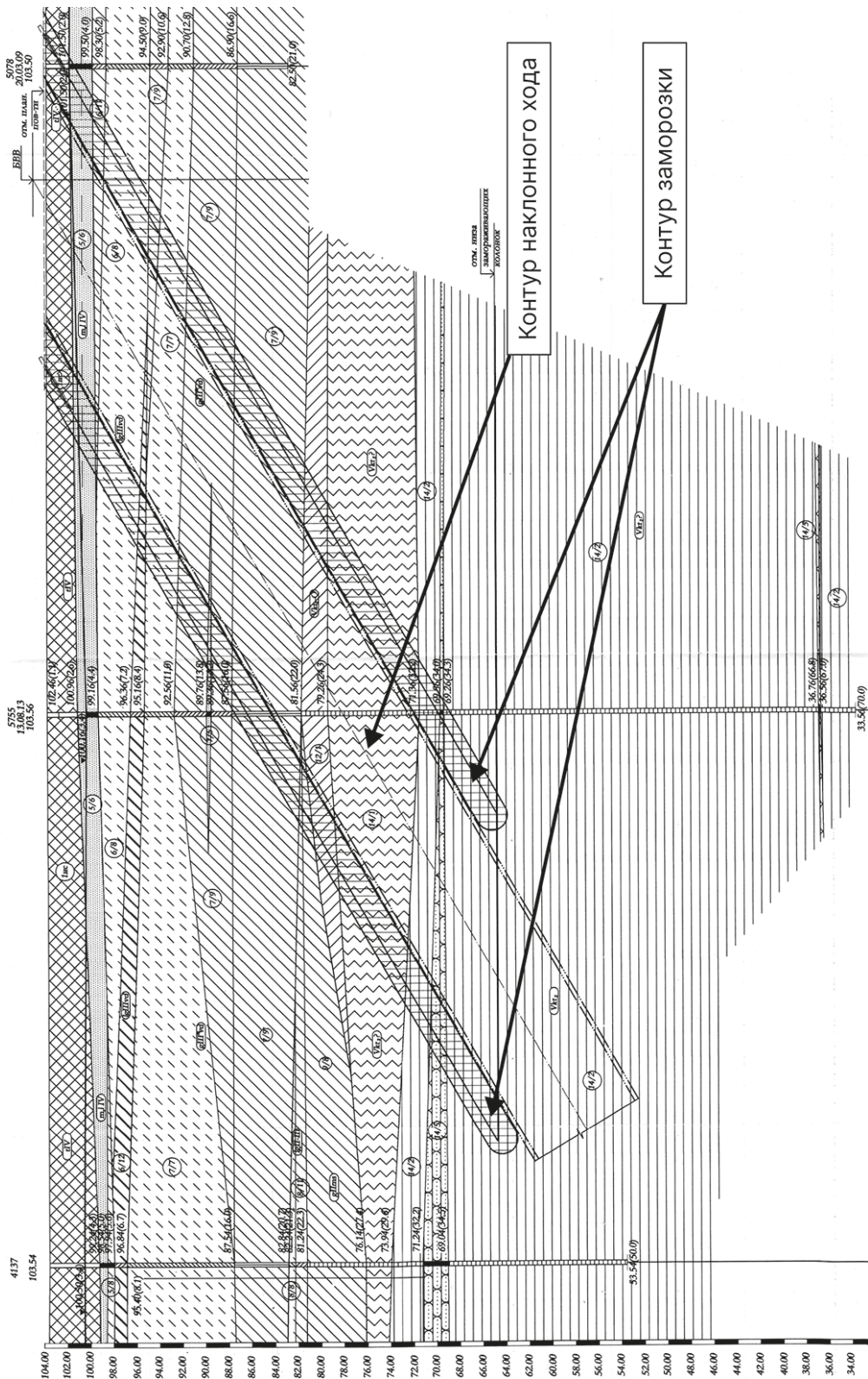


Рис. 3. Геологический разрез и проектное положение наклонного хода

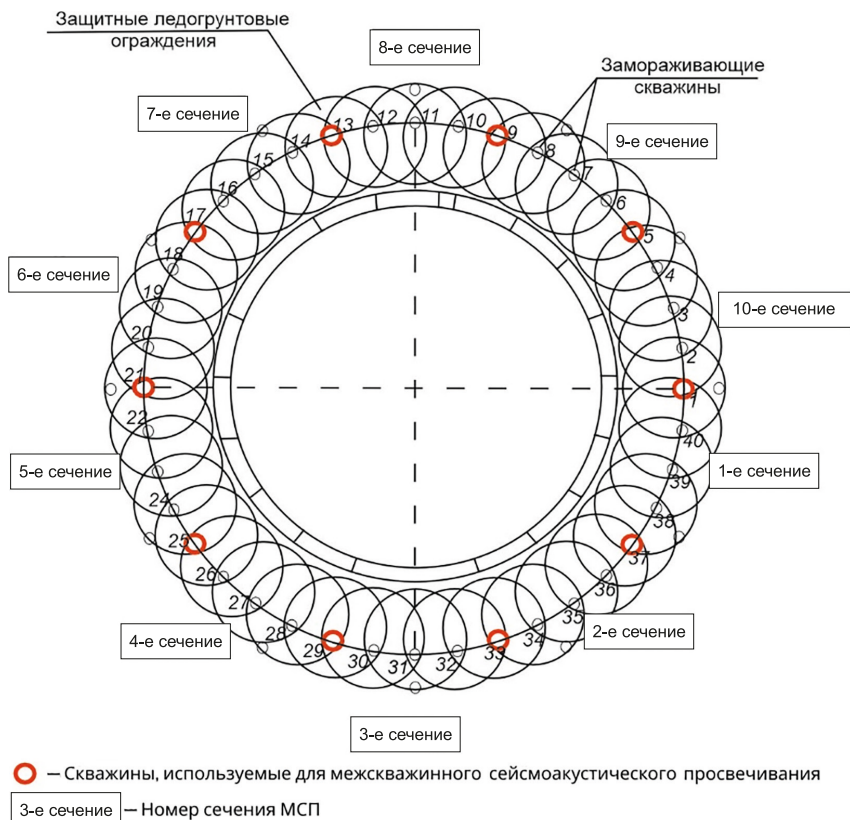


Рис. 4. Положение контрольных скважин для производства МСП для оценки сплошности ледогрунтового ограждения

сформированного ледогрунтового ограждения вокруг проектного положения наклонного хода.

На изображении представлены две развертки по окружности ледогрунтового ограждения. На томографических разрезах отмечается достаточно равномерное распределение повышенных скоростных характеристик, указывающих на мерзлое состояние вмещающих грунтов. При этом выделяются и локальные низкоскоростные области, в которых сплошность ледогрунтового ограждения на момент завершения активной фазы замораживания не обеспечена. Низкоскоростные области приурочены к прослоям водонасыщенных песчаников и слою дислоцированных глин с прослоями песчаника. В то же время субвертикальное распространение выделенной низкоскоростной области и отсутствие признаков влияния водонасыщенного слоя песчаников на соседних сечениях может быть связано с некондиционной работой хладонесущей системы.

В результате исследований были даны рекомендации по необходимости проверки работоспособности всех систем рециркуляции хладагента и продолжению активной фазы замораживания для устранения выявленных непромороженных локальных участков.



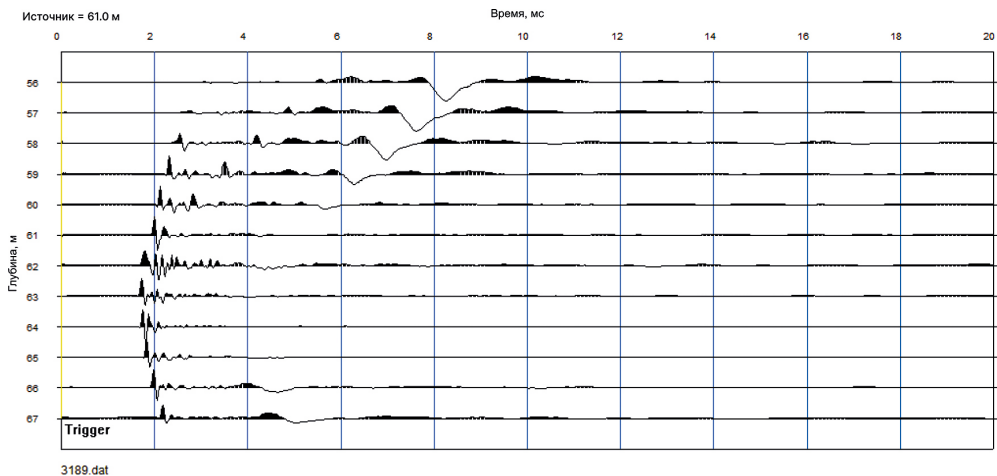


Рис. 5. Сейсмограмма сечения 10 на глубинах от 56 до 67 м вдоль оси скважин

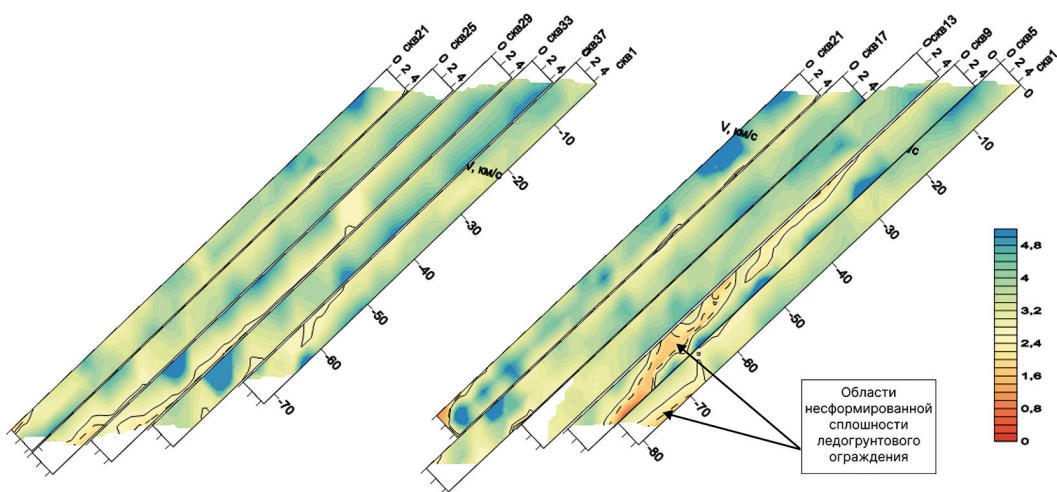


Рис. 6. Результаты исследований, выполненных после регламентного срока активной фазы замораживания

## 5. Выводы

С помощью метода межскважинной сейсмической томографии возможно эффективно оценивать сплошность создаваемого ледогрунтового ограждения, могут быть выделены локальные участки, в которых процесс замораживания оказался недостаточным и необходимо дополнительное замораживание для обеспечения сплошности возводимого ограждения. При необходимости могут быть рассчитаны основные физико-механические характеристики ледогрунтовой среды.

Параметры, полученные методом межскважинной сейсмоакустической томографии, необходимы также для уточнения технологического режима по замораживанию грунтов.

## Литература

- Архипов, А. Г. (2015). Сейсмоакустическая диагностика состояния массивов естественных и искусственных грунтов. В: *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в России*. СПб.: Изд-во НМСУ «Горный», 162–166.
- Безродный, К. П. и Лебедев, М. О. (2021). Реализация новых конструкций и технологий при строительстве петербургского метрополитена. В: *Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения*. М.: Перо, 38–45.
- Болгаров, А. Г. и Рослов, Ю. В. (2009). Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач. *Технологии сейсморазведки*, № 1, 105–111.
- Вялов, С. С. (1959). *Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов*. М.: АН СССР.
- Горяинов, Н. Н. и Ляховицкий, Ф. М. (1979). *Сейсмические методы в инженерной геологии*. М.: Недра.
- Исаев, Ю. С., Дорохин, К. А., Бойко, О. В. (2021). Опыт применения сейсмоакустической томографии для оценки сплошности ограждающих конструкций типа «стена в грунте». В: *Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения*. М.: Перо, 97–105.
- Ошкин, А. Н., Рагозин Н. А., Игнатъев В. И., Ермаков Р. Ю. (2016). Межскважинное сейсмическое просвещение — опыт, методология, аппаратура. *Приборы и системы разведочной геофизики*, 3, 37–47.
- Петрухин, В. П. (2010). Геотехнические проблемы строительства в Москве — крупнейшем мегаполисе России. В: *Геотехнические проблемы мегаполисов. Т. 1*. СПб.: Изд-во «Группа компаний Геореконструкция».
- Трупак, Н. Г. (1974). *Замораживание грунтов в подземном строительстве*. М.: Недра.
- Тютюник, П. М. (1994). *Геоакустический контроль процессов замораживания и тампонирувания пород*. М.: Недра.
- Тютюник, П. М. и Солодов, А. М. (1991). *Методические указания по лабораторно-практическим занятиям по разделу «Контроль процессов замораживания пород в подземном строительстве»*. М.: МГИ.
- Улицкий, В. М., Шашкин, А. Г., Шашкин, К. Г. (2010). *Геотехническое сопровождение развития городов: прак. пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной застройки*. СПб.: Изд-во «Группа компаний Геореконструкция».
- Хакимов, Х. Р. (1957). *Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов*. М.: Академии наук СССР.
- Шишкина, М. А., Фокин, И. В., Тихоцкий, С. А. (2014). Разрешающая способность межскважинной лучевой сейсмической томографии: расстановка, скоростная модель, конечная частота сигнала. Информационный портал института ИФЗ РАН. [online] Доступно на: <https://ifz.ru/nauka/fundamentalnyie/razreshayushaya-sposobnost-mezhskvazhinnoj-luchевой-sejsmicheskoy-tomografii-rasstanovka-skorostnaya-model-konechnaya-chastota-signala> [Дата доступа 10.10.2023].
- Шишкина, М. А., Фокин, И. В., Тихоцкий, С. А. (2015). К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой томографии. *Технологии сейсморазведки*, 1, 5–21.
- Dobróka, M. and Szegedi, H. (2014). On the Generalization of Seismic Tomography Algorithms. *American Journal of Computational Mathematics*, 4 (1), 37–46.
- Hamid, N. A. (2017). Seismic Hydrocarbon Exploration: 2D and 3D Techniques. In: *Advanced in Oil and Gas Exploration and Production*. Springer International Publishing Switzerland.
- Kubota, K., Kiho, K., Mizohata, S., Murakami, F. (2015). Development of directional drilling system and measurement method in the borehole application of seismic tomography between surface and the borehole. *10<sup>th</sup> Asian Regional Conference of IAEG*. [online] Доступно на: [http://www.jseg.or.jp/2015ARC/data/TP4/TP4-P05\\_1080009\\_1510841.pdf](http://www.jseg.or.jp/2015ARC/data/TP4/TP4-P05_1080009_1510841.pdf) [Дата доступа 10.10.2023].

Статья поступила в редакцию 19 октября 2023 г.  
Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

Контактная информация:

Дорохин Кирилл Александрович — [d.k\\_a@mail.ru](mailto:d.k_a@mail.ru)

Бойко Олег Владимирович — [boy1ko@yandex.ru](mailto:boy1ko@yandex.ru)

Сухарев Александр Михайлович — [suharevlmgt@gmail.com](mailto:suharevlmgt@gmail.com)

# Investigation of borehole seismic acoustic control by the cross-borehole exploration method to assess the continuity of ice-ground fencing

K. A. Dorokhin, O. V. Boiko, A. M. Sukharev

JSC “Lenmetroprotrans”,

2, ul. Bolshaya Moskovskaya, St. Petersburg, 191002, Russian Federation

**For citation:** Dorokhin, K. A., Boiko, O. V., Sukharev, A. M. (2024). Investigation of borehole seismic acoustic control by the cross-borehole exploration method to assess the continuity of ice-ground fencing. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2), 321–332. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.206> (In Russian)

Artificial freezing of soils is quite often used in complex engineering-geological and hydrogeological conditions for the construction of underground structures. Due to the fact that the soil freezing works are hidden, operational control of the continuity of the ice-ground fence being erected is necessary. Such control is traditionally carried out using borehole thermometry and hydrogeological observations. The article considers the possibilities of the seismoacoustic method in the variant of downhole tomography for monitoring the continuity of ice-ground fencing in conditions of highly saturated soils. The main prerequisite for using seismic methods to control the formation of an ice-ground fence is a noticeable difference in the values of the propagation velocities of seismic vibrations in soils under natural conditions and soils at subzero temperatures. The studies were carried out through the same wells through which the refrigerant is pumped. The configuration of the work was carried out in such a way that for each position of the receiving spit, the source moves along the adjacent well parallel to the receiving well with outflows equal to half the length of the receiving spit, after which the spit is shifted to the next position and the process is repeated. The control was carried out in two stages — before the active freezing phase and after the formation of the ice-ground fence. As a result of the work performed, it was found that using the SME method it is possible to effectively assess the continuity of the ice-ground fence being created, and local areas in which the freezing process turned out to be insufficient can also be identified. The parameters obtained by the method of downhole seismoacoustic tomography are also necessary to clarify the technological regime for freezing soils.

**Keywords:** cross-borehole tomography, ice-ground fencing, continuity control.

## References

- Arhipov, A. G. (2015). Seismic diagnostics of natural and artificial soil. In: *Perspektivy razvitiia inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossii*. St. Petersburg: NMSU Gornyy Publ., 162–166. (In Russian)
- Bezrodnyi, K. P. and Lebedev, M. O. (2021). Implementation of new designs and technologies during the construction of the St. Petersburg metro. In: *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiia podzemnykh sooruzhenii transportnogo naznacheniiia*. Moscow: Pero Publ, 38–45. (In Russian)
- Bolgarov, A. G. and Roslov, Yu. V. (2009). Borehole-to-borehole seismic tomography in solution of engineering and geological problems. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 1, 105–111. (In Russian)
- Dobróka, M. and Szegedi, H. (2014). On the Generalization of Seismic Tomography Algorithms, *American Journal of Computational Mathematics*, 4 (1), 37–46.
- Goriainov, N. N. and Liakhovitskii F. M. (1979). *Seismic methods in engineering geology*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Hamid, N. A. (2017). Seismic Hydrocarbon Exploration: 2D and 3D Techniques. In: *Advanced in Oil and Gas Exploration and Production*. Springer International Publishing Switzerland.
- Isaev, Iu. S., Dorokhin, K. A., Boiko, O. V. (2021). Experience in using seismoacoustic tomography to assess the continuity of wall-in-soil enclosing structures. In: *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiia podzemnykh sooruzhenii transportnogo naznacheniiia*. Moscow: Pero Publ, 97–105. (In Russian)

- Khakimov, Kh. R. (1957). *Issues of theory and practice of artificial freezing of soils*. Moscow: Akademii nauk SSSR Publ. (In Russian)
- Kubota, K., Kiho, K., Mizohata, S., Murakami, F. (2015). Development of directional drilling system and measurement method in the borehole application of seismic tomography between surface and the borehole. *10<sup>th</sup> Asian Regional Conference of IAEG*. [online] Available at: [http://www.jseg.or.jp/2015ARC/data/TP4/TP4-P05\\_1080009\\_1510841.pdf](http://www.jseg.or.jp/2015ARC/data/TP4/TP4-P05_1080009_1510841.pdf) [Accessed 10.10.2023].
- Oshkin, A. N., Ragozin, N. A., Ignat'ev, V. I., Ermakov, R. Iu. (2016). Interwell seismic imaging — experience, methodology, equipment. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*, 3, 57. (In Russian)
- Petrukhin, V. P. (2010) Geotechnical problems of construction in Moscow — the largest megacity in Russia. *Geotekhnicheskie problemy megapolisov*. Vol. 1. St. Petersburg: «Gruppa kompanii Georekonstruktsiia» Publ. (In Russian)
- Shishkina, M. A., Fokin, I. V., Tikhotskiy, S. A. (2014). Resolution power of borehole-to-borehole beam seismic tomography: arrangement, velocity model, final signal frequency. *Information portal of the Institute of the Earth's Physics, Russian Academy of Sciences*. [online] Available at: <https://ifz.ru/nauka/fundamentalnyie/razreshayushhaya-sposobnost-mezhskvazhinnoj-luchevoj-sejsmicheskoy-tomografii-rasstanovka-skorostnaya-model-konechnaya-chastota-signala>. (In Russian)
- Shishkina, M. A., Fokin, I. V., Tikhotskiy, S. A. (2015) Resolution capability of borehole-to-borehole beam seismic tomography. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 1, 5–21. (In Russian)
- Tiutiunik, P. M. (1994). *Geoacoustic control of rock freezing and plugging processes*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Tiutiunik, P. M. and Solodov, A. M. (1991). *Guidelines for laboratory and practical exercises in the section "Control of rock freezing processes in underground construction"*. Moscow: MGI Publ. (In Russian)
- Trupak, N. G. (1974). *Freezing of soils in underground construction*. Moscow: Nedra Publ., 280. (In Russian)
- Ulitskii, V. M., Shashkin, A. G., Shashkin, K. G. (2010). *Geotechnical support of urban development. A practical guide to the design of buildings and underground structures in densely built environments*. St. Peterburg: «Gruppa kompanii Georekonstruktsiia» Publ., 547. (In Russian)
- Vialov, S. S. (1959). *Rheological properties and bearing capacity of frozen soils*. Moscow: AN SSSR Publ. (In Russian)

Received: October 19, 2023  
Accepted: February 15, 2024

#### Authors' information:

Kirill A. Dorokhin — [d.k\\_a@mail.ru](mailto:d.k_a@mail.ru)  
Oleg V. Boiko — [boy1ko@yandex.ru](mailto:boy1ko@yandex.ru)  
Aleksandr M. Sukharev — [suharev1mgt@gmail.com](mailto:suharev1mgt@gmail.com)