



Сейсмоакустические межскважинные исследования для контроля сплошности ледогрунтового ограждения

Кирилл ДОРОХИН,
Олег БОЙКО,
Алексей СУХАРЕВ,
ОАО «НИПИИ
«Ленметрогипротранс»

Введение

Современное развитие городской инфраструктуры неминуемо связано с освоением подземного пространства для устройства транспортных коммуникаций, подземных паркингов, торговых зон и т.д. 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 сво-

Искусственное замораживание грунтов часто применяется в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях строительства метрополитенов. Для ведения безаварийной горной проходки необходимо контролировать сплошность создаваемого ледогрунтового ограждения. Такой контроль традиционно осуществляется с помощью скважинной термометрии и гидрогеологических наблюдений, но все чаще применяются дополняющие эффективные методы, способные увеличить объективность прогноза. В статье рассмотрены возможности сейсмоакустического метода в варианте межскважинной томографии для контроля сплошности ледогрунтового ограждения.

Ключевые слова: ледогрунтовое ограждение, межскважинная томография, контроль сплошности, метод межскважинного просвечивания (МСП).

временного выявления неблагоприятных инженерно-геологических условий и процессов, принятия и рационального применения эффективных проектных решений [1-2].

Сложные инженерно-геологические и гидрогеологические условия строительства метрополитенов зачастую требуют применения специальных способов производства работ, в

частности, искусственного замораживания грунтов. Этот способ, как наиболее эффективный и надежный, получил широкое распространение в метростроении[3].

При этом создание ледогрунтового ограждения и поддержание его в работоспособном состоянии во время проходки является непростой задачей из-за сложности технологического процесса и существования факторов, 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. По этой причине замораживание грунтового массива производится под обязательным инструментальным контролем эффективности, который согласно ВСН189-78 выполняется путем гидрогеологических и термометрических наблюдений, которые осуществляются в специально оборудованных скважинах в зоне замораживаемых грунтов. Стоит отметить, что 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.

Метод межскважинного сейсмоакустического просвечивания (МСП) с применением томографической обработки в области подземного строительства все чаще применяется

многими организациями, осуществляющими работы от инженерно-геологических изысканий до геотехнического мониторинга и научного сопровождения. Связано это в первую очередь с существенным скачком в области аппаратных и программных возможностей, которые появились в последнее десятилетие. Результаты множества эффективно решаемых задач методом межскважинной томографии (межскважинные сейсмоакустические просвечивания, МСП) довольно подробно изложены в ряде работ различных организаций и отдельных исследователей[10-16].

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Преимущество применения сейсмических методов для решения

данной задачи объясняется, прежде всего, экономической эффективностью, мобильностью, скоростью выполнения, а главное, наличия высоких корреляционных связей между скоростью распространения сейсмических волн и свойств грунтового массива в мерзлом и не мерзлом состоянии.

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[17,18].

В качестве примера в таблице ниже приведены примеры значений скоростей упругих волн в некоторых породах в естественных условиях и в мерзлом состоянии (табл.1):

Таблица 1. Скорости упругих волн в некоторых породах верхней части разреза (по данным Н.Н. Горяинова и Ф.М. Ляховицкого, 1979 г.) [17]

Породы	Состояние породы	Скорость продольной волны (V _p , м/с)
Обломочно-песчаные:		
галечники	неводонасыщенное	400-800
	водонасыщенное	2000-2700
	мерзлое (-3 °С)	3800-4800
пески	неводонасыщенное	200-500
	водонасыщенное	1500-2000
	мерзлое (-3 °С)	3400-4000
Глинистые:		
супеси	неводонасыщенное	250-550
	водонасыщенное	1450-1800
	мерзлое (-3 °С)	2800-3500
суглинки	неводонасыщенное	300-600
	водонасыщенное	1500-1900
	мерзлое (-3 °С)	2200-2800
глины	неводонасыщенное	400-1800
	водонасыщенное	1800-2500
	мерзлое (-3 °С)	1900-2300



Исходя из данных приведенной выше таблицы, можно отметить, что скорость сейсмических волн в замороженных грунтах существенно выше, чем в незамерзших. 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.

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), которые эффективно применяются 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[10-16].

Стоит отметить, что скважинные исследования имеют ряд преимуществ перед поверхностными методами:

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

- высокая разрешающая способность наблюдений в связи с приближением источников и приемников к среде исследования на всей её протяженности и с отсутствием необ-

ходимости регистрации волн через неоднородный поглощающий поверхностный слой[11,12].

Контрольные исследования для оценки сплошности ледогрунтового ограждения производятся после завершения активной фазы замораживания с использованием замораживающих скважин, наполненных рассолом. В данные скважины для измерений методом МСП опускаются скважинные зонды.

Для производства МСП выбираются скважины с приблизительно равным интервалом (4-5м) (рис.1).

Каждая пара скважин при производстве МСП образует исследуемое томографическое сечение на всю глубину изучаемой среды.

При производстве исследований методом МСП для каждой пары скважин в одну рассолонаполненную скважину опускается приемная коса (в нашем случае это гидрофонная 12-ти канальная коса), а в другую – погружается электроискровой источник мощностью 1200Дж (рис.2).

Исследования производятся в следующей последовательности:

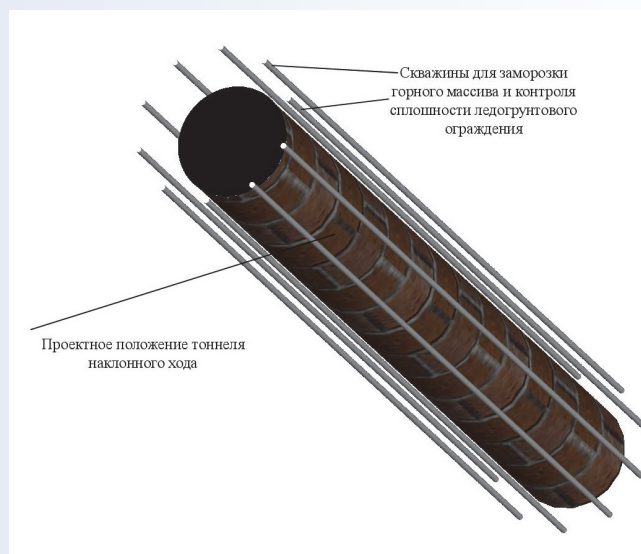


Рисунок 1. а) Изображение приемной и излучающей скважин при производстве МСП по контуру замораживания; б) модель положения скважин, используемых как для заморозки, так и для контроля сплошности ледогрунтового массива

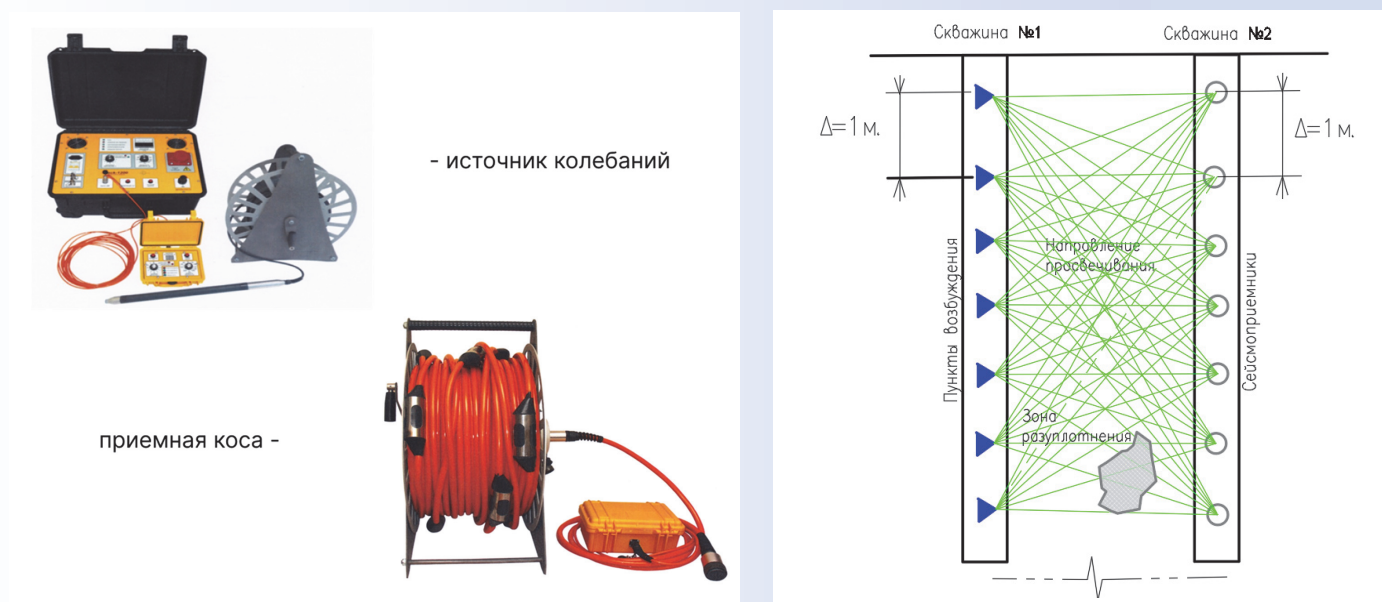


Рисунок 2. Принципиальная схема производства МСП и скважинные зонды

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).

Геофизический контроль производится в два этапа. Первый – до начала активной фазы замораживания для идентификации структуры исследуемой среды и оценки её 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.

ПРИМЕРЫ ПОЛУЧАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже представлены результаты, полученные на реальном объекте при возведении ледогрунтового ограждения при строительстве наклон-

ного хода станции метрополитена в Санкт-Петербурге.

Строительство наклонного хода ведется в следующих геологических условиях (рис.3):

Грунты по разрезу представлены насыпными грунтами, супесями, суглинками с включениями гравия и гальки и глинами различной консистенции, на разрезе встречается слой водонасыщенных песчаников кварцевых 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 рис.4.

В результате исследований были построены сейсмотомографические разрезы (рис.5) представляющие состояние сформированного ледогрунтового ограждения вокруг проектного положения наклонного хода.

На изображении представлены 2 развертки по окружности ледогрун-

тового 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.

По результатам исследований заказчику был передан акт с положением выявленных аномальных зон и рекомендации по продолжению активной фазы замораживания для их устранения.

ВЫВОДЫ

С помощью метода межскважинной сейсмической томографии эффективно оценивается сплошность создаваемого ледогрунтового ограждения, выделяются участки, в которых процесс замораживания ока-

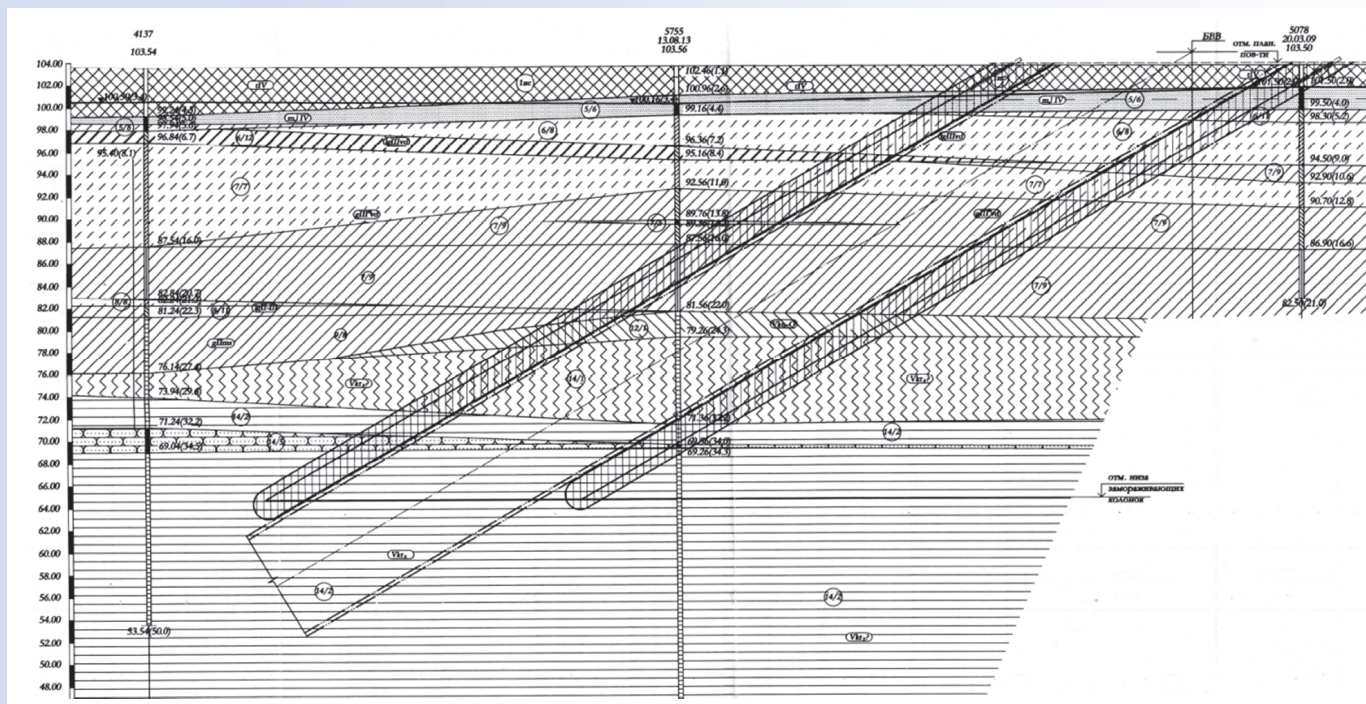


Рисунок 3. Геологический разрез и проектное положение наклонного хода

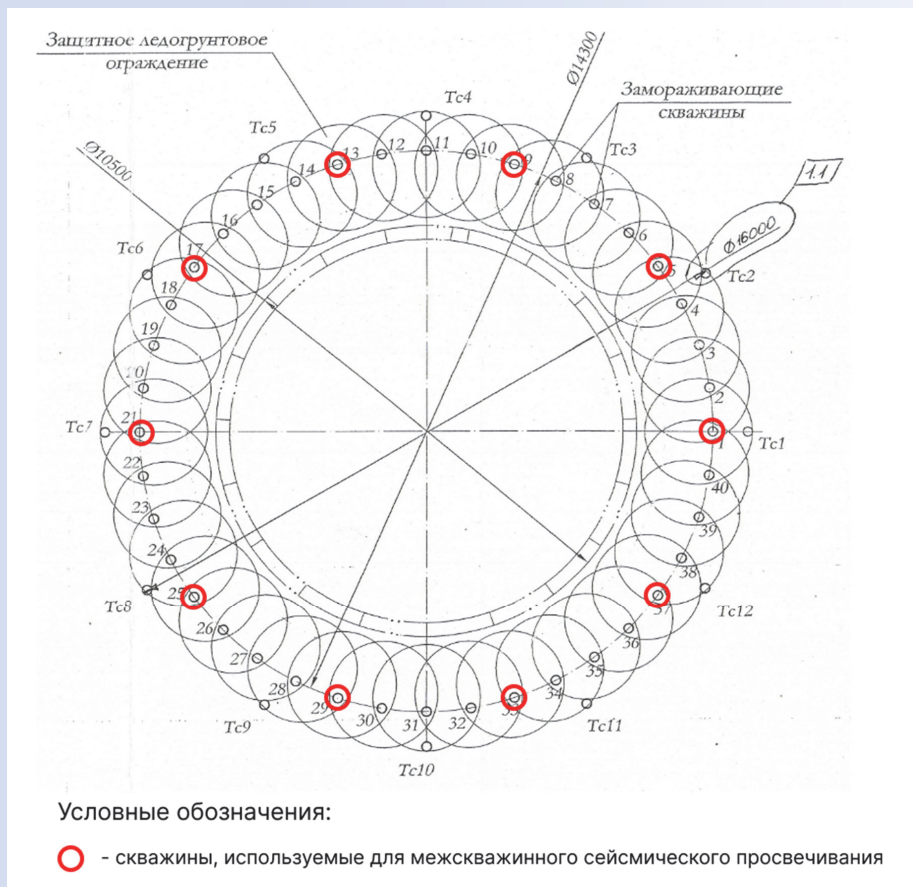


Рисунок 4. Положение контрольных скважин для производства МСП для оценки сплошности ледогрунтового ограждения

заялся 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 технологических режимов по замораживанию грунтов.

К основным преимуществам метода межскважинной сейсмической томографии для решения задачи по оценке сплошности ледогрунтового ограждения можно отнести прежде всего:

- высокую разрешающую способность исследований;
- возможность наблюдений практически на любые глубины даже в стесненных городских условиях (определяется глубиной скважин);
- возможность исследований в массиве прямо под основаниями зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Геотехническое сопровождение развития городов. Практическое пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной застройки. «Стройиздат Северо-Запад» Изд-во «Группа компаний «Геореконструкция», 2010г. с.547

2. Петрухин В.П. Геотехнические проблемы строительства в Москве – крупнейшем мегаполисе России. – Геотехнические проблемы мегаполисов. СПб: Изд-во «Группа компаний Геореконструкция», 2010. Т.1.,с.259

3. Безродный К.П., Лебедев М.О. Реализация новых конструкций и технологий при строительстве петербургского метрополитена Сборник статей «Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения» М.: «Перо» 2021. с.38-45

4. Тютюник П.М. Геоакустический контроль процессов замораживания и тампонирования пород. -М.: Недра, 1994.

5. Тютюник П.М., Солодов А.М. Методические указания по лабора-торно-практическим занятиям по разделу «Контроль процессов замораживания пород в подземном строительстве» Ч. II. – М.: МГИ, 1991.

6. Трупак Н. Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. М.: Недра; 1974. 280 с.

7. Вялов С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. М.: АН СССР; 1959. 192 с.

8. Хакимов Х. Р. Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов. – Изд-во Академии наук СССР, 1957. – 191 с.

9. Архипов А.Г. «Сейсмоакустическая диагностика состояния массивов естественных и искусственных грунтов» – «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в России»

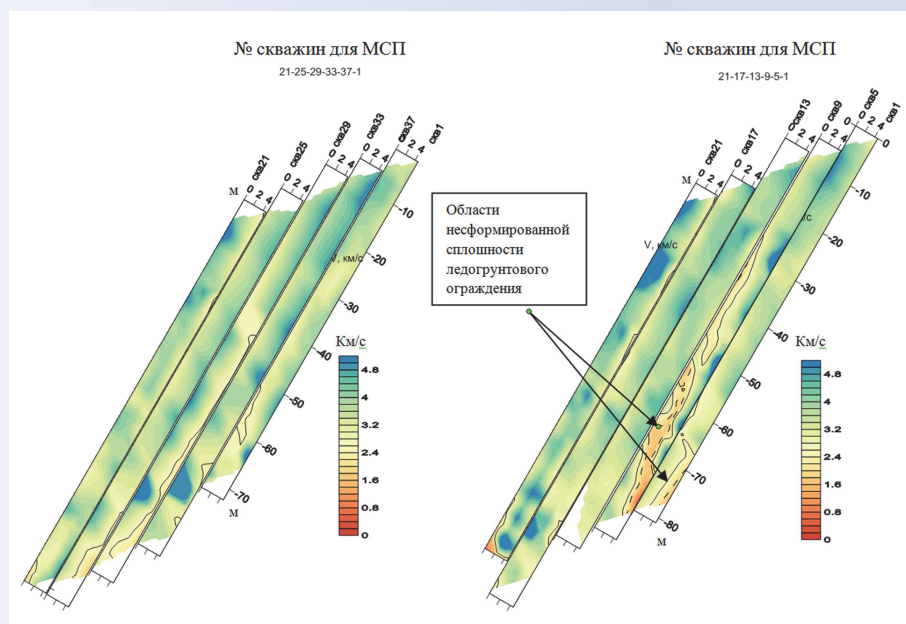


Рисунок 5. Результаты исследований, выполненных после регламентного срока активной фазы замораживания

Изд-во: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015 с. 162-166.

10. Болгаров А. Г., Рослов Ю. В. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач. Технологии сейсморазведки. №1. 2009. с. 105-111

11. Шишкина М. А., Фокин И. В., Тихоцкий С. А. Разрешающая способность межскважинной лучевой сейсмической томографии: расстановка, скоростная модель, конечная частота сигнала. Информационный портал института ИФЗ РАН. URL: <http://www.ifz.ru/lab-202/inverse-problems/tomo-resolution/>.

12. Шишкина М. А., Фокин И. В., Тихоцкий С. А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой томографии. Журнал: Технологии сейсморазведки №1, 2015. с. 5-21

13. Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Бойко О.В. Опыт применения сейсмоакустической томографии для оценки сплошности ограждающих конструкций типа «стена в грунте» Сборник статей «Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транс-

портного назначения» М.: «Перо» 2021. с.97-105

14. Hamid N. Alsadi Seismic Hydrocarbon Exploration: 2D and 3D Techniques. Advanced in Oil and Gas Exploration and Production. Springer International Publishing Switzerland. 2017. p.325

15. Dobróka, M. and Szegedi, H. On the Generalization of Seismic Tomography Algorithms, American Journal of Computational Mathematics, 2014, Vol. 4 No. 1, pp. 37-46

16. Kubota K., Kiho K., Mizohata S., Murakami F. Development of directional drilling system and measurement method in the borehole application of seismic tomography between surface and the borehole/10th Asian Regional Conference of IAEG.2015 URL: http://www.jseg.or.jp/2015ARC/data/TP4/Tr4-P05_1080009_1510841.pdf

17. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. –М.: Недра, 1979,-с.143

18. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики под редакцией Богословского В. А. издательство «Недра» Москва 1990г. с.502.