

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СКВАЖИННЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 2D- И 3D-ПОСТРОЕНИЙ

К.А. Дорохин

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: d.k_a@mail.ru

Аннотация: В настоящее время большой необходимостью развития городов-миллионников является освоение подземного пространства для устройства транспортных коммуникаций, подземных паркингов, торговых зон и т.д. При реализации подобных проектов существенно возрастает риск возникновения аварий и повреждения существующей застройки в зонах влияния строительных работ. Возможность снижения риска возникновения аварий при строительстве в городской черте появляется только при условии всестороннего анализа конкретной ситуации с выявлением и минимизацией неблагоприятных факторов, оказывающих негативное влияние на существующую застройку или возводимый объект [1, 2]. Применение геофизических методов для комплексной оценки состояния вмещающего массива существенно увеличивает оперативность и объективность геотехнического мониторинга в целом. При этом преимущества метода межскважинного сейсмического просвечивания (МСП) заключаются в высокой разрешающей способности и возможности производить исследования практически на любые глубины, даже в стесненных городских условиях. Изложен опыт применения МСП для решения задачи по оценке фактического состояния грунтового массива на участке с проявлениями деформационных процессов на поверхности, вызванных аварией при строительстве метрополитена. Отражены преимущества 3D-построений МСП для выделения локальных аномалий в разрезе.

Ключевые слова: межскважинное сейсмическое просвечивание, скважина, скважинная сейсмическая коса, генератор импульсов, сейсмотомография, тоннель, геологическая среда, сейсмический источник, веерная схема наблюдений.

Для цитирования: Дорохин К. А. Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D- и 3D-построений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 80–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88.

Experience of borehole seismic sounding for the assessment of physical state of rock mass using 2D and 3D representations

K.A. Dorokhin

OJSC «SRPSI «Lenmetrogioprotrans», Saint-Petersburg, Russia, e-mail: d.k_a@mail.ru

Abstract: Megacities currently expand through development of underground space with a view to constructing transportation routes, underground parking areas, commercial areas, etc. In the course

of implementation of such projects, the risk of accidents and damage of surface site development in the influence zone of underground construction considerably elevates. The accident risk reduction potential appears only with comprehensive analysis of the specific situation, with finding and minimizing adverse factors that affect the existing building system or a new construction site [1, 2]. Application of geophysical methods for integrated assessment of enclosing rock mass considerably improves operational efficiency and objectiveness of geotechnical monitoring in whole. The method of borehole-to-borehole seismic sounding (BSS) is advantageous for fine resolution and applicability at any depth, event in the space-limited urban environment. The article describes BSS application in assessment of physical state of soil area below surface site with deformation phenomena caused by an accident during subway construction. The benefits of 3D BSS representations in detection of local anomalies in cross-sections are demonstrated.

Key words: borehole-to-borehole seismic sounding, borehole, borehole seismic cable, impulse generator, seismic tomography, tunnel, geological environment, seismic source, fan observation pattern.

For citation: Dorokhin K. A. Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D и 3D — построений. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;5:80-88. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88.

Введение

Основным объектом инженерно-геофизических исследований при строительстве является массив горных пород, под которым понимается обособленная часть геологической среды, находящаяся в сфере инженерного воздействия. Эта часть среды исследуется с целью установления условий производства строительных работ и последующей эксплуатации возведенных сооружений. При этом массив горных пород рассматривается как сложная геологическая система, обладающая некоторыми характеристиками: структурой, вещественным составом, физическим состоянием, определенными свойствами и динамикой.

Поле напряжений, действующее в грунтовом массиве, сочетает в себе как естественные напряжения, так и напряжения техногенного происхождения, связанные с созданием крупных наземных или подземных сооружений. При этом влияние техногенных напряжений часто значительно превосходит природную составляющую [3].

Изменение напряженного состояния влияет на уровень трещиноватости и пористости пород. При релаксации, напри-

мер, происходит увеличение этих параметров, т.е. происходит разуплотнение пород. В свою очередь, как трещинное, так и поровое разуплотнение приводит к уменьшению сопротивляемости пород сдвигу из-за нарушения структурного сцепления, одновременно увеличивается сжимаемость и водопроницаемость пород [4].

Оценка горнотехнических условий — это необходимый этап прогнозирования возможных деформаций, проектирования мероприятий по ликвидации неблагоприятных факторов и решения ряда других практических важных задач. Пренебрежение геофизическими исследованиями снижает оперативность и объективность геотехнического мониторинга в целом. Ведь большинство применяемых при мониторинге прямых геомеханических методов являются, во-первых, точечными, что снижает достоверность оценки состояния всего исследуемого массива с учетом масштабного эффекта, при этом они трудоемки и достаточно дороги, а во-вторых, большинство применяемых методов, как правило, лишь констатируют факт происходящих деформаций, а при условии, если деформации

имеют стремительный характер, такие данные мониторинга могут оказаться запоздалыми.

Геофизические исследования, напротив, позволяют заблаговременно выявлять негативные процессы в массиве задолго до возникновения фактических деформаций.

Метод МСП

Основная идея метода МСП (межскважинное сейсмоакустическое просвечивание) состоит в просвечивании (прозвучивании) среды сейсмическими лучами и построении на основе наблюдаемых времен вступления карты скоростей распространения продольных и поперечных волн, которые, в свою очередь, позволяют перейти к оценке упругодеформационных и прочностных свойств среды [5]. Суть метода заключается в возбуждении упругой волны в одной скважине, регистрации в другой и дальнейшем анализе ее кинематических и динамических характеристик.

Большое влияние на получение достоверного решения поставленной задачи оказывает выбор системы наблю-

дений межскважинного просвечивания. В теории к методу предъявляется одно из основных условий — это стремление к более плотному по угловым координатам покрытию исследуемой области траекториями сейсмических лучей [6, 7]. Однако в зависимости от решаемых задач и исследуемых сред, требуемой детальности изучения возможно применение различных систем наблюдений. В практике широко используется веерная схема наблюдений (рис. 1).

Стоит отметить существенные преимущества метода МСП [8–12]:

- приближение источников и приемников непосредственно к объекту исследования, что позволяет получить данные с высоким соотношением сигнал/шум, так как регистрируемый сигнал не искажен влиянием неоднородного и поглощающего приповерхностного слоя;
- практически нет ограничений по глубине исследований, в отличие от поверхностных методов, что позволяет производить исследования на большие глубины даже в стесненных городских условиях.

Результатом предварительной обработки МСП является массив данных для последующего томографического построения, который представлен совокупностью значений времен пробега волн в среде между источниками возбуждения упругих колебаний и приемниками. Также учитывается соответствие каждому положению источника и приемника их пространственные координаты (рис. 2).

В свою очередь, томографическая обработка МСП материалов сводится к получению кинематических разрезов, характеризующих особенности распределения значений скоростей сейсмических волн в исследуемой среде.

Для более детального изучения среды, например, для выделения локальных аномалий, при условии использования плотной сети скважин, через которые

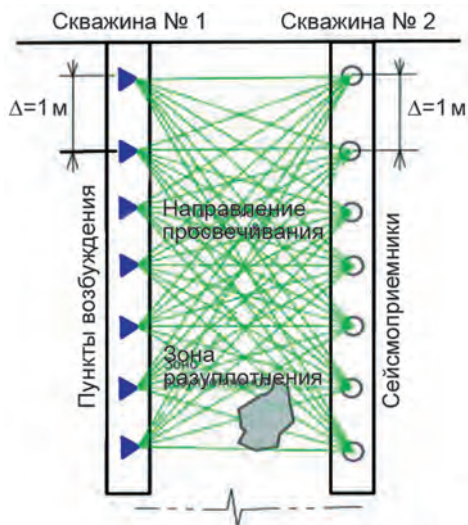


Рис. 1. Веерная схема производства МСП
Fig. 1. Fan BSS pattern

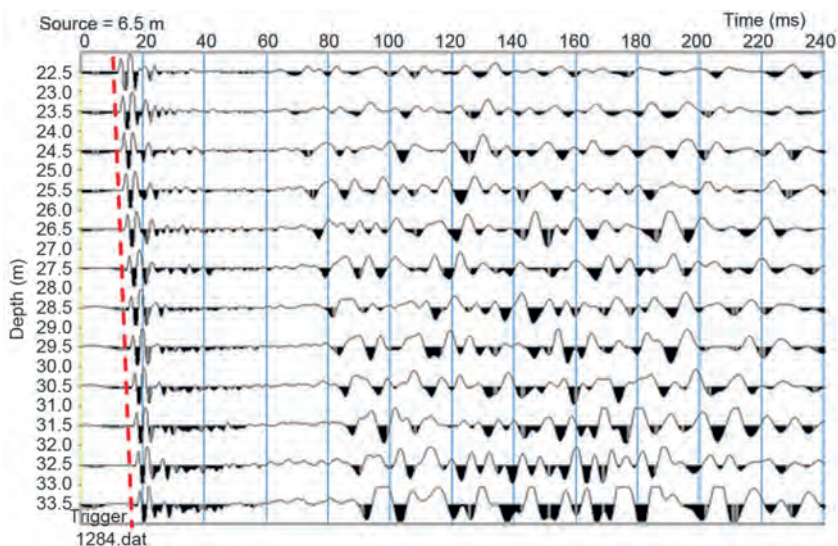


Рис. 2. Сейсмограмма с первыми вступлениями продольных волн (источник находится на глубине 6,5 м, приемная 12-ти канальная коса с гидрофонами)

Fig. 2. Seismogram with first arrivals of P-waves (source location depth is 6.5 m, receiving 12-channel cable with hydrophones)

производятся просвечивание, успешно применяется 3D-построения [10, 13], с помощью которых существенно упрощается интерпретация регистрируемых данных МСП.

Применение МСП для оценки фактического состояния грунтового массива на участке деформационных процессов на поверхности

Исследования выполнялись в зоне аварийного (1974 г.) участка тоннелей петербургского метрополитена с целью оценки фактического состояния вмеща-

ющего грунтового массива в условиях естественного залегания, а также уточнения зон, границ и объемов нарушенных грунтов, которые могли образоваться в результате геологических процессов (участок находится в палеорусле) или в качестве последствий аварии.

Просвечивание выполнялось между заранее подготовленными 13 скважинами (рис. 3). Длины скважин (~86 м) позволяли произвести исследования вмещающего грунтового массива на всю глубину заложения аварийных тоннелей.

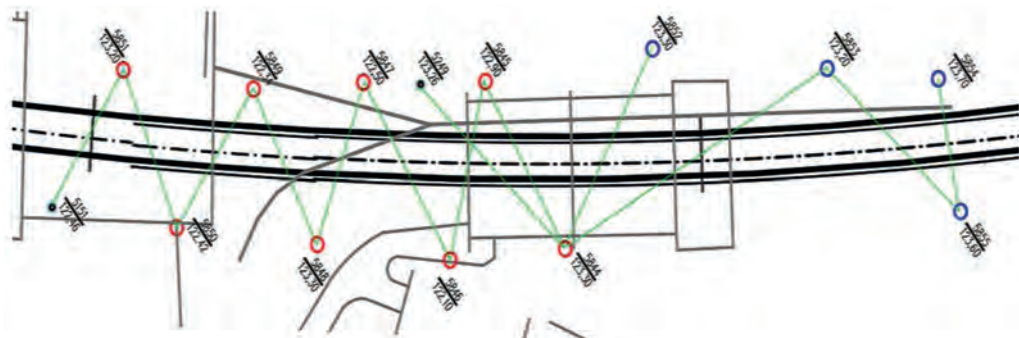


Рис. 3. Схема расположения скважин МСП и лучей просвечивания

Fig. 3. Pattern of BSS holes and sounding beams

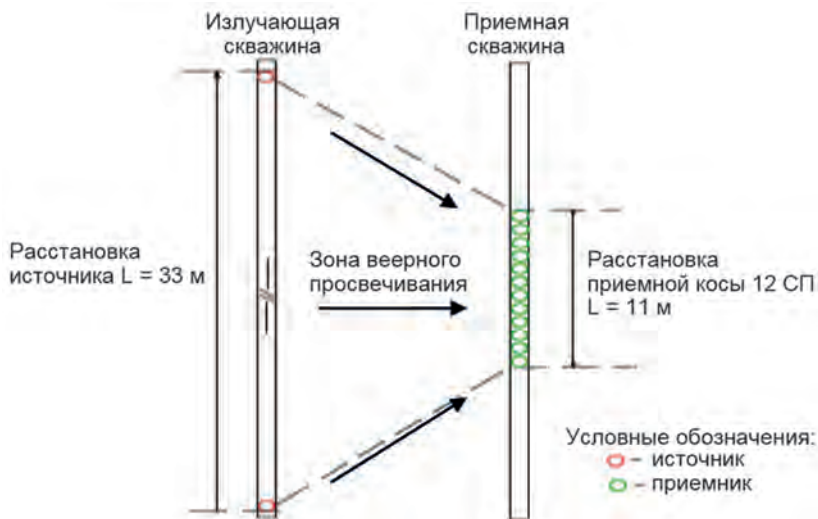


Рис. 4. Схема перемещения излучающего элемента при одном положении приемной косы
 Fig. 4. Radiating element displacement at the same position of receiving cable

Необходимо отметить, что столь длинные скважины невозможно пробурить абсолютно вертикальными, при этом адекватность результатов МСП напрямую зависит от правильно измеренного расстояния между точкой приема и точкой возбуждения сигнала. Поэтому перед межскважинными сейсмоакустическими исследованиями были проведены работы по оценке траектории скважин методом инклинометрии. Обработка материалов МСП осуществлялась уже с известными пространственными координатами точек возбуждения и приема сигнала.

При выполнении данных исследований использовалась веерная система наблюдений, в которой просвечивание межскважинного пространства осуществляется одновременно с использованием одного излучающего зонда и приемной линии, состоящей из 12 гидрофонов, расположенных с шагом 1 м. При этом для каждой установки приемной косы излучающий зонд перемещается с шагом 1 м на тройное расстояние расстановки сейсмоприемников (рис. 4). Это позволило повысить разрешающую способность исследований за счет увеличения

плотности лучей, а также направленности прохождения прямой волны от источника к приемнику.

Выбор системы наблюдений был обоснован имитационными модельными исследованиями [6, 7], с помощью которых оценивалась связь разрешающей способности лучевой сейсмической межскважинной томографии и геометрии расположения приемников и источников, дискретности системы и т.д. Исследования, проведенные в работе, показали, что:

- параллельная расстановка (просвечивание из скважины в скважину) эффективна только при обнаружении локализованных аномалий скорости, при условии, что их размер больше диаметра зоны Френеля или равен ему, а также при изучении субгоризонтальных структур (слоистого разреза);
- при наличии технической возможности при исследованиях следует организовать дополнительную линию наблюдений (или возбуждений) на поверхности земли, соединяющую устья скважин. Это позволяет заметно увеличить разрешающую способность.

Обработка материалов МСП

Процесс томографической обработки состоит из двух взаимодополняющих друг друга этапов — решения прямой и обратной задачи.

Решение прямой задачи состоит в расчете траекторий и времен пробега волны для некоторой опорной (наперед заданной) скоростной модели изучаемого объекта. В качестве опорной модели используется осредненная скоростная модель среды (данные сейсмического каротажа или ВСП).

В настоящее время практически все существующие пакеты программ сейс-

мотомографии основаны на методике итеративной реконструкции при решении как прямых, так и обратных задач. Итеративный подход заключается в повторении операции теоретического расчета значений параметра для каждого луча, сравнения его с наблюдаемым значением соответствующего луча, вычислении разности и распределении ее по отдельным ячейкам (пикселям) вдоль каждого луча. Процесс итерации повторяется до тех пор, пока разности между наблюдаемым и расчетными значениями не станут меньше некоторой заданной величины.

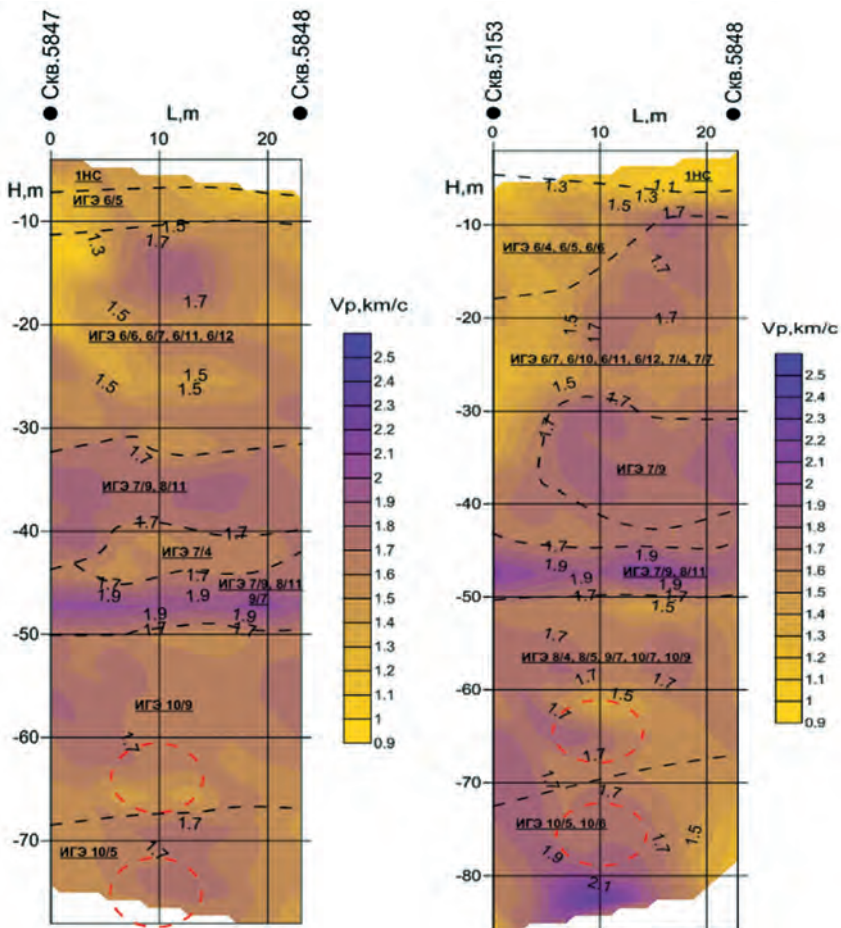


Рис. 5. Пример полученных сейсмотомографических разрезов между двумя парами скважин
Fig. 5. Example of obtained seismic tomography cross-sections between two pairs of boreholes

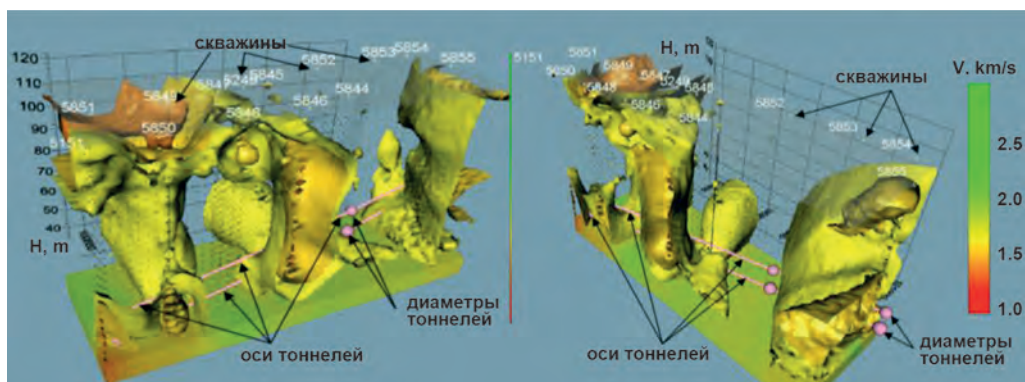


Рис. 6. 3D-изображение зон ослабленных грунтов по скоростям продольных волн (срез от $V_p = 1,6$ км/с и ниже)

Fig. 6. 3D image of weakened soil zones by P-wave velocities (cut from $V_p = 1.6$ km/s and lower)

В результате первичной обработки были получены массивы данных кинематических характеристик горных пород, а с помощью программы для обработки сейсмических данных были построены сейсмотомографические разрезы, представляющие собой разрезы значений скоростей упругих волн.

На рис. 5 приведены в виде примера лишь сейсмотомографические разрезы между парами скважин № 5847—№ 5848 и № 5849—№ 5848, которые отображают строение и свойства межскважинной среды. Контуры тоннелей нанесены в соответствии с их плановым расположением.

Стоит отметить, что в представленном виде использовать изображения для анализа грунтового массива на предмет выделения локальных ослабленных зон, которые могли возникнуть в результате аварии, достаточно сложно, тем более когда необходимо дать некоторую объемную оценку объекта исследований. По этой причине результаты МСП были представлены в виде 3D-изображении (рис. 6). Для отображения ослабленных зон был подобран скоростной срез, с помощью которого на модели отображались только структуры, характеризующиеся скоростями ниже 1,6 км/с.

Результаты исследований

На 3D-изображениях хорошо прослеживаются субвертикальные зоны («воронки»), которые характеризуются пониженными скоростями.

Возникновение данных «воронки» ослабленных грунтов вероятно связано с прорывами грунтов в тоннель в момент аварии.

В последующем выделенные зоны могли выполнять роль суффозионных окон, по которым происходит фильтрация поверхностных вод в глубокие горизонты (пески плавунного типа).

Наличие сильно разуплотненных областей в грунтовом массиве были подтверждены буровыми работами. В частности, во время бурения, возникали случаи провалов буровой колонны в глубину на 5—7 м.

Отсутствие замкнутых контуров фильтрационных зон (воронки), изображенных на 3D-изображениях, не позволяет в полной мере определить их простираение. Это связано с ограниченным количеством скважин на объекте исследования. При этом расположение суффозионных воронок согласуется с данными геодезической съемки территории, по данным которой выделяются участки провалов земной поверхности.

Выводы

- метод МСП увеличивает возможности комплекса геофизических исследований для решения инженерно-геологических задач, связанных с оценкой фактического состояния вмещающего грунтового массива в условиях естественного залегания, уточнения зон, гра-

ниц и объемов нарушенных грунтов, возникших, в том числе в результате аварии;

- применение 3D-построений при условии плотной системы наблюдений позволяет существенно облегчить процесс интерпретации материалов для решения задач, связанных с выделением локальных малоcontrastных областей.

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. — СПб.: «Стройиздат Северо-Запад», Изд-во «Группа компаний «Геореконструкция», 2010. — 547 с.

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

3. Huber M. Soil variability and its consequences in geotechnical engineering *Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung (Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart)*, 2013 p.302.

4. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики / Под ред. В. А. Богословского. — М.: Недра, 1990. — 502 с.

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

6. 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/>.

7. Шишкина М. А., Фокин И. В., Тихоцкий С. А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой томографии // Технологии сейсморазведки. — 2015. — № 1. — С. 5—21.

8. Dorokhin K. A., Boyko O. V. Seismoacoustic monitoring to assess the quality of the execution of protective structures and compensatory strengthening of the soil rock / 14th conference and exhibition on engineering and mining geophysics 2018 Almaty, 2018, pp. 56—70.

9. Архипов А. Г. Сейсмоакустическая диагностика состояния массивов естественных и искусственных грунтов / Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в России. — СПб.: Изд-во НМСУ «Горный», 2015. — С. 162—166.

10. 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.

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

12. 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/TP4-P05_1080009_1510841.pdf.

13. Li Y., Hewett B. Borehole seismic quantitative diagnosis of a seismic velocity model for 3D seismic imaging of subsurface structures. *EAGE / Geophysical Prospecting*, 2014, Vol. 62, pp. 719—739. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Ulitskiy V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov. Prakticheskoe posobie po proektirovaniyu zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v uslovi-*

yakh plotnoy zastroyki [Geotechnical support of urban development. Practical guide on design of buildings and underground structures in the conditions of compact planning], Saint-Petersburg, «Stroyizdat Severo-Zapad», Izd-vo «Gruppa kompaniy «Georekonstruktsiya», 2010, 547 p.

2. Petrukhin V. P. Geotechnical problems of construction in Moscow—the largest megacity in Russia. *Geotekhnicheskie problemy megapolisov*. Vol. 1. Saint-Petersburg, Izd-vo «Gruppa kompaniy Georekonstruktsiya», 2010, 259 p. [In Russ].

3. Huber M. *Soil variability and its consequences in geotechnical engineering* Doktors der ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung (Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart), 2013 p.302.

4. Ogil'vi A. A. *Osnovy inzhenernoy geofiziki*. Pod red. V. A. Bogoslovskogo [Basic engineering geophysics. Bogoslovskiy V. A. (Ed.)], Moscow, Nedra, 1990, 502 p.

5. Bolgarov A. G., Roslov Yu. V. Borehole-to-borehole seismic tomography in solution of engineering and geological problems. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2009, no 1, pp. 105–111. [In Russ].

6. Shishkina M. A., Fokin I. V., Tikhotskiy S. A. 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. URL: <http://www.ifz.ru/lab-202/inverse-problems/tomo-resolution/>.

7. Shishkina M. A., Fokin I. V., Tikhotskiy S. A. Resolution capability of borehole-to-borehole beam seismic tomography. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2015. no 1, pp. 5–21. [In Russ].

8. Dorokhin K. A., Boyko O. V. Seismoacoustic monitoring to assess the quality of the execution of protective structures and compensatory strengthening of the soil rock. *14th conference and exhibition on engineering and mining geophysics 2018*. Almaty, 2018, pp. 56–70.

9. Arkhipov A. G. Seismic diagnostics of natural and artificial soil. *Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossii*. Saint-Petersburg, Izd-vo NMSU Gornyy, 2015, pp. 162–166. [In Russ].

10. 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.

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

12. 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/TP4-P05_1080009_1510841.pdf.

13. Li Y., Hewett B. Borehole seismic quantitative diagnosis of a seismic velocity model for 3D seismic imaging of subsurface structures. *EAGE. Geophysical Prospecting*, 2014, Vol. 62, pp. 719–739.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дорохин Кирилл Александрович — кандидат технических наук,
зав. лабораторией, e-mail: d.k_a@mail.ru,
ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

K.A. Dorokhin, Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory, e-mail: d.k_a@mail.ru,
OJSC «SRPSI «Lenmetrogioprotrans»,
191002, Saint-Petersburg, Russia.

