

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИФИЧНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГРУНТОВОГО МАССИВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

## EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF SPECIFIC OBSERVATION SYSTEMS IN SEISMIC TOMOGRAPHY RESEARCH OF A SOIL MASSIF FOR SOLVING GEOTECHNICAL PROBLEMS

К. А. Дорохин, А. М. Сухарев, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

K. A. Dorokhin, A. M. Sukharev, JSC «NIPII «Lenmetrogioprotrans»

**В статье рассмотрены специфичные варианты исследований массивов сейсмоакустическими методами с последующей томографической обработкой данных в условиях, когда поставленная задача не может быть решена ни методами поверхностного профилирования, ни методами межскважинного просвечивания.**

*The article considers specific options for studying arrays by seismoacoustic methods with subsequent tomographic processing of data, in conditions when the task cannot be solved by methods of surface profiling or methods of cross hole seismic.*

Основным объектом сейсмоакустических 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.

Изменение напряженного состояния влияет на уровень трещиноватости и пористос-

ти пород. При релаксации, например, происходит увеличение этих параметров, т. е. разуплотнение пород. Как трещинное, так и поровое разуплотнение приводит к уменьшению сопротивляемости пород сдвигу из-за нарушения структурного сцепления, одновременно увеличивается схимаемость и водопроницаемость пород [1].

Выявление и оценка образовавшихся ослабленных зон – необходимый этап прогнозирования последующих осадок инженерных конструкций, зданий, находящихся в зоне влияния строительных работ для последующего проектирования мероприятий по ликвидации деформационных процессов и решения ряда других практически важных задач.

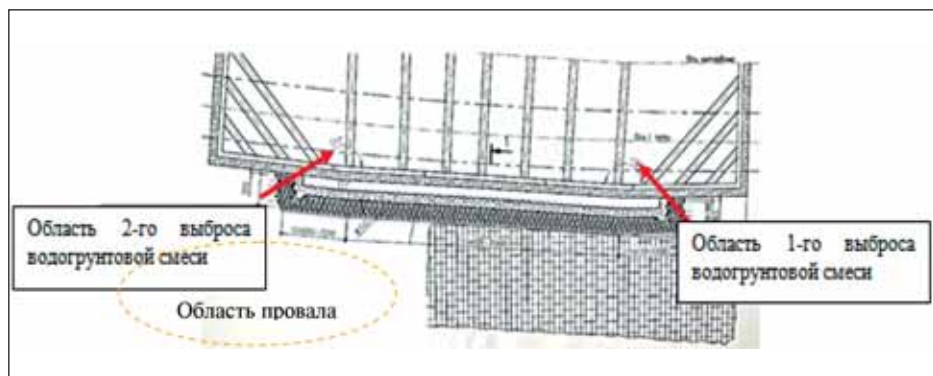
Иногда для решения задач по оценке состояния грунтового массива требуется применение специфичных подходов, хотя и вполне стандартными инструментами и способами интерпретации. Это связано с тем, что по различным причинам стандартные методики, например, поверхностные методы, либо не работают (разрезы с инверсным

распределением скоростных характеристик или наличие в разрезе экранирующего слоя), либо просто нет доступа к необходимой для исследования среде, например, грунты под основаниями зданий и пр.

### Методика исследований

Сейсмоакустические исследования для решения геотехнических задач широко применяются в области строительства. Еще в конце 50-х и начале 60-х годов прошлого столетия в связи со строительством гидроэлектростанций в Сибири, Средней Азии и Закавказье были использованы сейсмоакустические методы для изучения упругих и деформационно-прочностных свойств скальных пород. Работы и публикации А. И. Савича, Ф. М. Ляховицкого, В. Н. Никитина, В. И. Коптева и других специалистов в отношении изучения свойств скальных пород методами сейсмоакустики послужили толчком для их применения при исследовании дисперсных грунтов. С конца 60-х и начала 70-х годов сейсмоакустические методы стали использоваться с целью изучения свойств физико-механических свойств дисперсных пород в различных их состояниях. С появлением сейсмической томографии существенно возросли возможности сейсмоакустики, что связано с повышением детальности и разрешающей способности, особенно для изучения сложнопостроенных и мало контрастных сред. Кинематические и динамические особенности распространения упругих волн в геологической среде позволяют не только на качественном уровне изучить строение среды, выявить ослабленные и суффозионные зоны, но также количественно оценить упруго-деформационные и прочностные свойства массива пород в целом и на его от-

Рис. 1. Схема котлована с нанесенными зонами аварийного выброса водно-грунтовой смеси на глубине около 20 м



дельных локальных участках, что очень важно для решения геотехнических задач.

В последнее десятилетие всё чаще возникают задачи, связанные с контролем фактического состояния грунтового массива в период строительства для сохранения городской инфраструктуры. Данные наблюдения направлены на своевременное выявление возникающих деструктивных процессов в грунтовом массиве, получение необходимых данных для проектирования противоаварийных/превентивных мероприятий и для оценки эффективности уже реализованных решений. В настоящее время появилось большое количество публикаций, посвященных геофизическим наблюдениям для решения геотехнических задач в период строительства. К ним можно отнести работы, связанные с сейсмоакустическим контролем различных инъекционных закреплений грунтового массива под основаниями зданий и сооружений, оценки сплошности удерживающих и противофильтрационных конструкций, контроль противоаварийных мероприятий при подземном строительстве и пр. [2–7]. Стоит отметить, что в последнее время наибольшее предпочтение отдается скважинным методам. Это связано с высокой разрешающей способностью и методической реализацией в стесненных городских условиях [8, 9].

Но что, если у исследователей нет возможности провести скважинные исследования? В подобных ситуациях при использовании стандартного набора оборудования большое значение имеет индивидуально подобранная система наблюдений, которая позволяет решить конкретную поставленную задачу. Методика наблюдений в большинстве случаев напоминает просвечивание, но без применения скважин и скважинного оборудования.

К стандартному набору оборудования относятся:

- многоканальная (в нашем случае 24-х канальная) сейсмостанция;
- приемная коса с комплектом сейсмоприемников;
- ударный источник сейсмического импульса (кувалда).

Шаг между сейсмоприемниками (велоциметрами) выбирается исходя из требуемой детальности исследований и составляет, как правило, 2–5 м.

Выбор системы наблюдений, а именно взаимное расположение приемной косы и пунктов расположения источника, зависит от поставленной задачи, геометрических размеров исследуемого объекта, а также условий производства исследований.

### Примеры применения нестандартных подходов

**Пример 1.** После возведения противофильтрационной и удерживающей конструкции «стена в грунте», когда уже почти весь грунт был вынут из котлована, с интервалом в несколько дней на глубине 19–20 м произошли два выброса водно-грунтовой смеси в области некачественно выполнен-

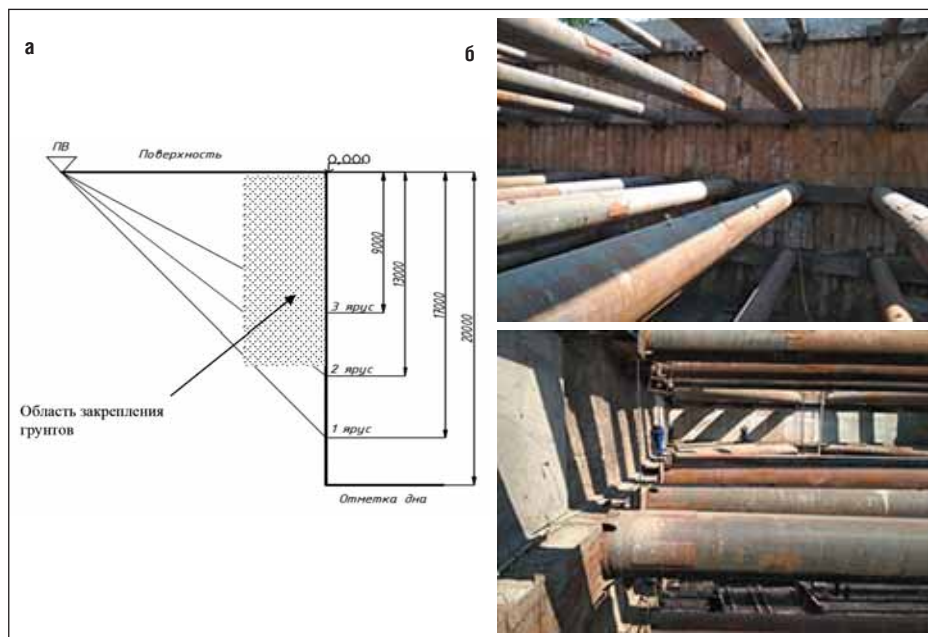


Рис. 2. Схема выполнения исследований относительно поверхности и дна котлована (а), фото расположения ярусов, вдоль которых производилась расстановка сейсмоприемников (б)

ных стыков между железобетонной монолитной стеной и стеной из свай БСС (рис. 1). Аварии были успешно локализованы, но в котлован вышло порядка 350 м<sup>3</sup> водно-грунтовой смеси. Стоит отметить, что первый выброс (в правой части стены), около 300 м<sup>3</sup>, не вызвал осадок поверхности, а в результате второго, существенно меньшего по объему (около 50 м<sup>3</sup>), в левой области поверхности образовался провал глубиной примерно до 1 м и диаметром около 9 м.

В соответствии с геологией в верхней части разреза до 26 м прослеживаются различные пески с прослоями супесей и суглинков, ниже – залегают глины. Анализ возникшей ситуации показал, что дневная поверхность в правой части, по всей видимости, удерживается искусственно созданным слоем грунтов, закрепленным инъекционными нагнетаниями. Слой имеет мощность около 13 м и перекрывает образовавшуюся в результате выброса ослабленную область.

Дальнейшее производство строительных работ требовало установку у котлована многотонного крана, а это, в связи с имеющейся на глубине ослабленной областью, могло повлечь за собой новую аварию. По этой причине появилась необходимость опреде-

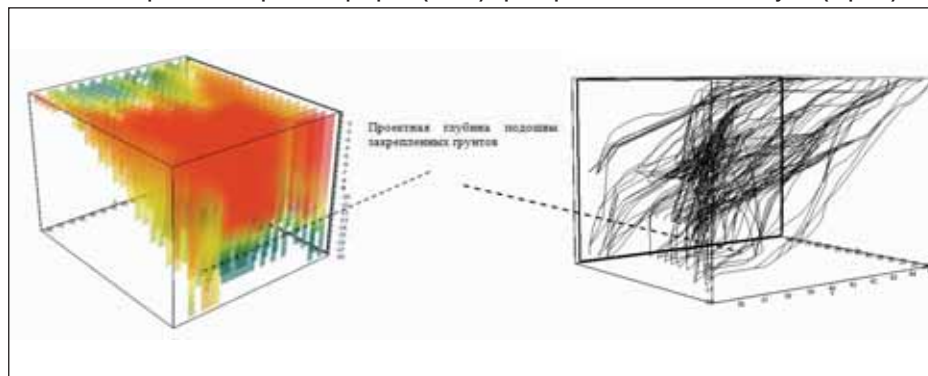
ления расположения образовавшейся во вмещающем массиве ослабленной области для проектирования дальнейших мероприятий по устранению последствий двух выбросов в котлован.

Поверхностные методы исследования в данной ситуации малоэффективны в связи с наличием в разрезе экранирующего (высокоскоростного) слоя закрепленного грунта, а также с отсутствием скважин на объекте, которые можно было бы использовать для сейсмоакустического просвечивания. Поэтому для решения поставленной задачи были выполнены сейсмоакустические исследования в виде сеймопросвечивания между дневной поверхностью и стеной котлована на различных уровнях (рис. 2).

Сейсмоприемники крепились на стену котлована с шагом 2 м, а возбуждение колебаний осуществлялось на дневной поверхности параллельно линии приема с шагом 5 м. Регистрация велась на открытом канале с частотой оцифровки 4 кГц, для усиления полезного сигнала использовалось накопление.

Приемная коса с датчиками поочередно была расположена на глубинах около –9 м (3 ярус), –13 м (2 ярус), –17 м (1 ярус) от по-

Рис. 3. 3D-изображение скоростного разреза (слева), трассирование сейсмических лучей (справа)





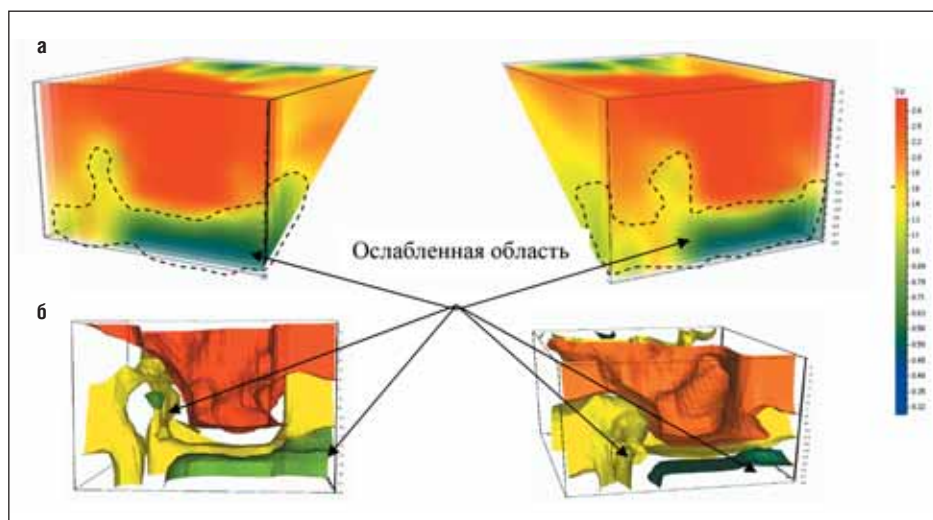


Рис. 4. 3D-изображение с выделенной зоной сильно пониженных скоростей, по всей видимости связанных с разуплотнением при прорывах водно-грунтовой смеси в котлован

верхности земли, где возбуждались сейсмические колебания.

Результаты сейсмопросвечивания было решено представить в виде 3D-изображения распределения скоростей в исследуемой среде (программа ZONDst3d) (рис. 3).

Для выделения аномальных участков визуализация изображения была настроена таким образом, чтобы выделить высокоскоростную среду примерно 2,8 км/с, которая характеризует массив закрепленных грунтов и низкоскоростную среду, связанную с зоной ослабления в результате выноса водно-грунтовой смеси в котлован (рис. 4а, б).

Стоит отметить, что в связи с высоким уровнем техногенных помех из-за работающей строительной техники, снять с сейсмограмм первые вступления продольных волн удалось только фрагментарно. Поэтому были сняты времена наиболее интенсивных последующих фаз, по которым и выполнили последующие построения. По этой причине скорости продольных волн несколько занижены, и разрезы дают представление только об относительном изменении упругих характеристик грунта.

По результатам исследований вдоль восточной стенки была выделена одна общая субгоризонтальная ослабленная область, которая образовалась в результате выноса водно-грунтовой смеси в котлован. При этом слой закрепленных грунтов в зоне наибольшего выноса действительно удержал поверхность от просадок, а грунты вдоль нижней части стены были существенно ослаблены, что стало причиной второго выноса и последующей осадки поверхности.

**Пример 2.** Сейсмоакустические исследования выполнялись с целью оценки качества работ по инъекционному упрочнению грунтов для снижения негативного влияния техногенных процессов при строительстве подземной выработки на здания, находящиеся в зоне влияния строительных работ.

Инъекционные закрепления грунтов должны были быть выполнены согласно проекту по принципиальной схеме, представленной на рис. 5.

Для объективной оценки качества и эффективности мероприятий по закреплению грунтового массива сейсмоакустическими

методами необходимо выполнить нулевой цикл измерений, который покажет характеристики грунтов до производства нагнетаний. Для этих целей были выполнены как скважинные исследования по методике МСП, так и сейсмоакустические наблюдения на поверхности. Так как нагнетания предполагались по всей площади дома, а перекрытия подвальных помещений не позволяли произвести профилирование внутри подвала, для решения поставленной задачи применили несколько нестандартный подход: для оценки состояния грунтового массива под основанием здания было выполнено поверхностное просвечивание по схеме, представленной на рис. 6.

Глубина преломляющего горизонта определялась по данным МСП (рис. 7а). Преломляющим горизонтом для продольных волн являлась кровля суглинков, залегающая на глубине примерно 5,5 м. Принципиальная идея выполненных поверхностных просвечиваний представлена на рис. 7б.

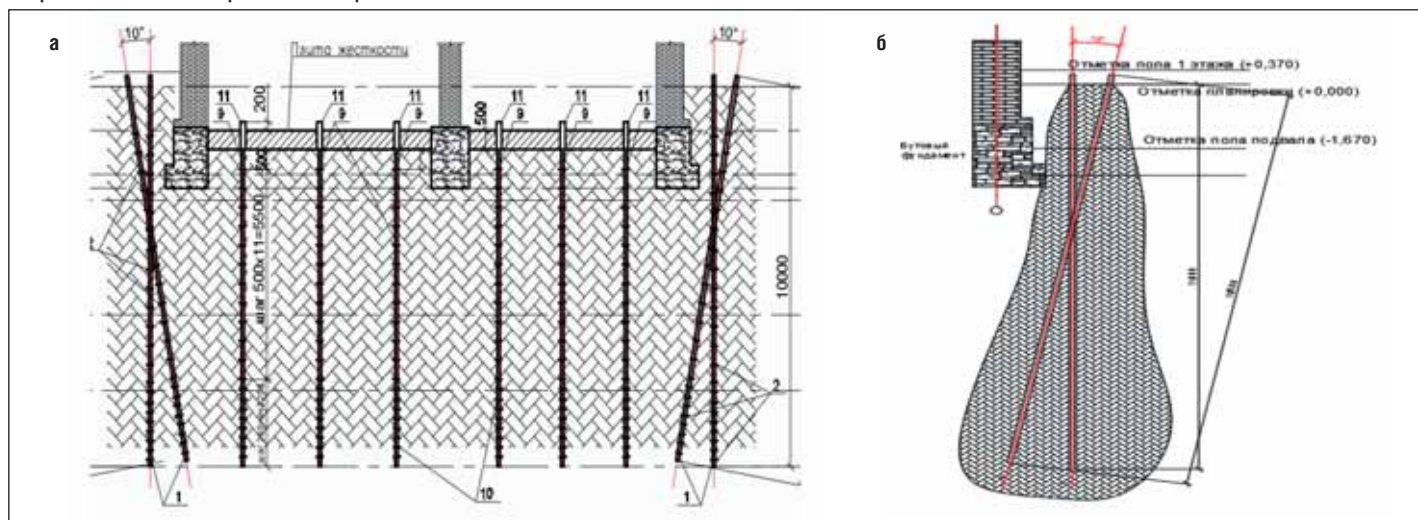
При поверхностном просвечивании регистрируются первые вступления преломленной головной и рефрагированных волн, скорость прохождения которых позволяет дать оценку о состоянии кровли преломляющих горизонтов и вышележащих грунтов, а при построении томографического изображения получить детальное изображение распределения скоростных характеристик грунтов под основанием здания по траектории распространения волн в массиве.

В результате выполненного поверхностного сейсмоакустического просвечивания под зданием был построен скоростной разрез, который характеризовал грунты под основанием здания (рис. 8).

В результате исследований были выделены участки как с относительно высокой, так и с относительно низкой скоростью распространения упругих волн. Чем выше скорость, тем, как правило, выше прочностные и несущие способности грунтов.

После инъекционных закреплений будет выполнен следующий цикл сейсмического

Рис. 5. Принципиальная схема инъекционных закреплений грунтового массива в основаниях зданий: а – положение инъекционных колон в основании здания; б – расчетная область закрепления от вертикальной и наклонной скважины



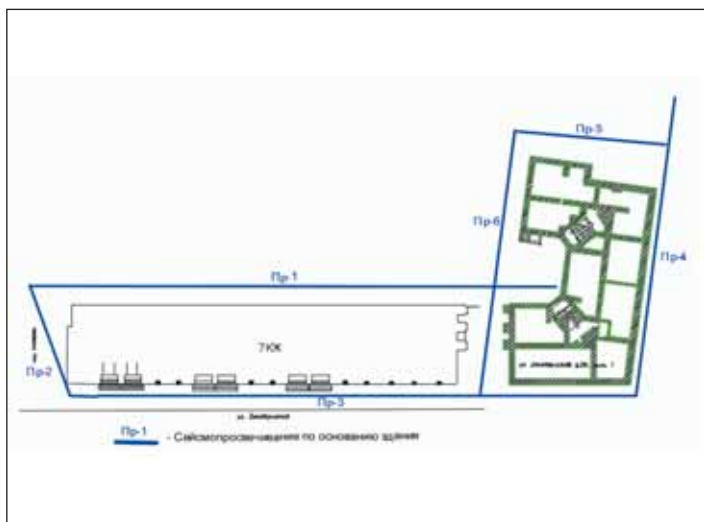


Рис. 6. Примененная схема просвечивания под основанием здания

просвечивания, и по изменению скоростного распределения сделан вывод о качестве укрепительных мероприятий.

Здесь стоит обратить внимание на интересный момент: в центральной части здания выделяются два участка (на рис. 8 обозначены 1 и 2) с аномально высокими скоростями упругих волн. По всей видимости, эти высокоскоростные зоны характеризуют остатки старого фундамента Литовского замка, сохранившегося под фундаментом современного дома.

Литовский замок – бывшая тюрьма в Санкт-Петербурге, в округе Коломна, у пересечения реки Мойки и Крюкова канала, напротив Новой Голландии. В 1929–1930 гг. он был разобран. На массивном и прочном фундаменте старого Литовского замка по проекту советских архитекторов был возведен жилой комплекс [10].

## Выводы

Достаточно часто при решении различных инженерно-геологических или геотехнических задач исследователи сталкиваются с условиями, которые не позволяют применять стандартные подходы и методики. В таких ситуациях необходимо подбирать индивидуальные, а иногда совсем нестандартные подходы.

В основе нестандартного подхода при сейсмоакустических исследованиях ключевое место занимает выбор системы наблюдений, а именно взаимное расположение приемной косы и пунктов расположения источников. Геометрия наблюдений в свою очередь зависит от поставленной задачи, геометрических размеров исследуемого объекта, а также геологических и техногенных условий объекта исследований.

Отдельно стоит отметить, что исследования в виде поверхностного просвечивания могут быть очень эффективными при решении археологических задач.

## Список литературы

1. Основы инженерной геофизики. А. А. Огильви, под редакцией В. А. Богословского. М.: Недра 1990. – 501 с.

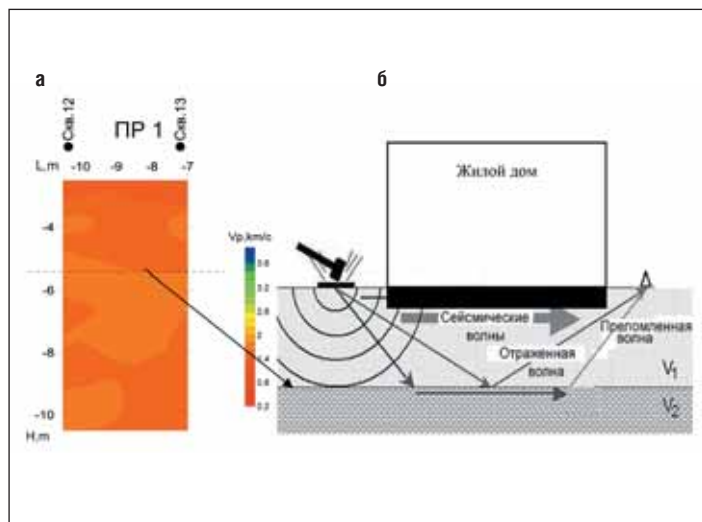


Рис. 7. Сейсмотомографический разрез МСП (а); принципиальная схема поверхностных просвечиваний (б)

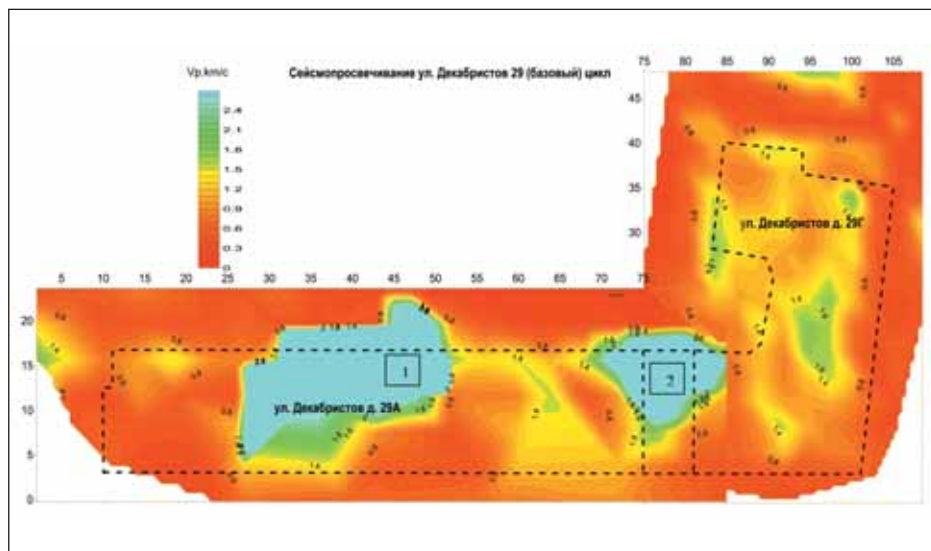


Рис. 8. Распределение скоростей продольных волн под домом

2. Dorokhin K., Boyko O. Seismoacoustic monitoring to assess the quality of the execution of protective structures and compensatory strengthening of the soil massif. *Engineering And Mining Geophysics 2018 – 14th Conference And Exhibition*.

3. Дорохин К. А. «Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки свойств, строения, структуры и состояния массива горных пород с использованием 2D и 3D построений» *Горный информационно-аналитический бюллетень № 5/2019*, с. 80–88.

4. 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 транспортного назначения» М.: «Перо» 2021*, с. 97–105.

5. Миндель И. Г., Севостьянов В. В., Трифонов Б. А., Рагозин Н. А. Сейсмическое просвечивание грунтов в основании существующих сооружений. *Геоэкология*, 2017, № 2, с. 65–73.

6. G. Fernández, T. Teixidó, J. A. Peña, F. Burillo, J. Claros. Using shallow geophysical methods to characterize the monumental building at the Segeda.

7. Фоменко Н. Е., Капустин В. В., Гапонов Д. А., Фоменко Л. Н. Исследование техногенного закреплённых грунтов основания фундаментов радиолокационным и сейсмическими методами в условиях длительно эксплуатируемого объекта культурного наследия. *Известия Томского политехнического университета*, 2018, № 8, с. 16–29.

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

9. Шишкина М. А., Фокин И. В., Тихоцкий С. А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии. *Технологии сейсморазведки*, 2015, № 1, с. 5–21.

10. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Литовский\\_замок](https://ru.wikipedia.org/wiki/Литовский_замок).

## Для связи с авторами

Дорохин Кирилл Александрович  
d.k\_a@mail.ru

