ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(5–1):56–69
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.34 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_56

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

М. Н. Воскресенский

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральское отделение Российской Академии Наук (УрО РАН), Екатеринбург, Россия, igfuroran@mail.ru

Аннотация: В описанном исследовании приводятся примеры практического применения методов преломленных (МПВ) и отраженных (МОВ) волн для изучения верхней части геологического разреза (ВЧР) в различных грунтовых условиях. Рассмотрены примеры на продольных (Vp) и поперечных (Vs) волнах на строительных площадках с грунтами I-III категории по сейсмическим свойствам. В каждом примере условия залегания коренных пород изменяются от 10 до 100 метров. Описаны используемые приборы и системы наблюдения. В качестве выводов перечислены конкретные задачи, решаемые на практике при помощи исследования ВЧР сейсмическими методами. Проведение малоглубинных сейсмических исследований методом преломленных волн на участках, отведенных под строительство зданий и сооружений различного назначения, обеспечивает получение значительного объема выходных данных, которые используются, прежде всего, по своему прямому назначению: построение скоростных разрезов МПВ и изучение физико-механических свойств грунта, что дает возможность оценки структурных особенностей ВЧР.

Ключевые слова: метод преломленных волн, метод отраженных волн, малоглубинная сейсморазведка, инструментальные сейсмические исследования, инженерные сейсмические изыскания, сейсмические волны, продольные волны, поперечные волны.

Для цитирования: *Воскресенский М. Н.* Инженерные сейсмические изыскания в различных грунтовых условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–1. — С. 56–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_56.

Engineering seismic surveys in various soil conditions

M. N. Voskresenskiy

Institute of Geophysics named after Yu.P. Bulashevich of the Ural Branch Russian Academy of Sciences (UB RAS), Yekaterinburg, Russia, igfuroran@mail.ru

Abstract: The described study provides examples of the methods of refracted and reflected waves practical application for studying the near-surface section in various soil conditions. Examples of P-waves and S-waves at construction sites with soils of I-III categories in terms of seismic properties are considered. In each example, the bedrock conditions vary from 10 to 100 meters. The used devices and observation systems are described. As conclusions, specific tasks are listed, which are solved in practice using the study of soil strata by seismic methods. Conducting near surface seismic studies by the method of refracted waves in areas for the construction of buildings and structures for various purposes provides a significant amount of output data. This data used primarily for building velocity sections of the refracted waves and

© М. Н. Воскресенский. 2022

studying the physical and mechanical soil characteristics, which makes it possible to assess the structural features of the near-surface section.

Key words: Refracted wave method, reflected wave method, near surface seismic survey, instrumental seismic studies, engineering seismic surveys, seismic waves, P-waves, S-waves.

For citation: Voskresenskiy M. N. Engineering seismic surveys in various soil conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5–1):56–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_56.

Введение

Для изучения характеристик приповерхностной толщи дисперсных грунтов на глубину до 20 м применяются различные геофизические методы, такие как: магниторазведка, электроразведка, сейсморазведка. Использование георадарной съемки позволяет получить структурный разрез до 10 метров [1]. Однако при увеличении влажности грунта данный метод практически не дает результата [2]. Электрометрические методы (вертикальное электрическое зондирование и аудиомагнитотеллурическое зондирование) дают возможность детально исследовать грунтовую толщу, особенно при наличии плотностных аномалий с различным удельным электрическим сопротивлением или высокоомных границ [3, 4]. Тем не менее, электроразведка оказывается очень восприимчива к разного рода электрическим помехам: высоковольтные линии электропередач, промышленные трансформаторы и подстанции электроснабжения. По этой причине электрометрия редко эффективно применяется в городских условиях. Сейсморазведка в свою очередь подходит для изучения влагонасыщенных грунтов (МПВ на поперечных Vs волнах). МПВ является помехоустойчивым методом (электрические наводки, промышленные вибрации и т. д.), поэтому широко применяется в городских условиях.

Основные цели инженерных сейсмических изысканий — это изучение ВЧР, уточнение строения и упругих свойств грунтовой толщи до ста метров.

Отдельно отметим, что согласно РСН 65—87 «Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ» следует изучать грунт на глубину до 20 м; согласно СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» — на глубину до 30 м; согласно СП283.1325800.2016 «Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования» — до границы с сейсмической жесткостью R не менее 2000 (г/см^3*м/с). Такой акустической (или сейсмической) жесткостью характеризуется кровля коренных пород (или условная «скала»). В различных регионах кровля коренных пород располагается по-разному: на глубинах порядка 5—10 м (например, Екатеринбург); 15—35 м (Свердловская область, Самара, Краснодарский Край); около 100 м (Башкирия, Алтайский Край).

Перед полевыми сейсмическими исследованиями проходят этапы рекогносцировочных работ, изучения геологического строения исследуемого участка. В результате специалисты выбирают, какие приборы и методы будут использоваться для достижения поставленных целей.

Методы проведения работ

Зачастую геофизики применяют типичное решение: 24-х канальные сейсмические станции и сейсмические косы с геофонами, расставленными с шагом два метра [5–7]. Таким обра-

зом, длина профиля составляет 46 м. Методика проведения работ МПВ с такой расстановкой позволяет изучать ВЧР на глубину 15—25 м. Причем, источником сигнала служит удар по металлической пластине кувалды, весом 5 кг, если речь идет о глубинах до 15—17 м. Глубины порядка 20—25 м порой приходится пробивать кувалдой весом в 10 кг. Когда предстоит исследование дисперсных грунтов мощностью до 50 м и более, стандартные подходы не работают.

Системы наблюдения МПВ и МОВ-ОГТ (метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки), расположение пунктов возбуждения и приема, варианты приборов регистрации полевых данных подробно описаны в работах профильных специалистов [8, 9].

Обработка сейсморазведочных данных МПВ Vp и Vs проводилась при помощи ПО ZondST2D (А. Каминский, Россия) в режиме однородно-слоистой инверсии в рамках концепции сейсмотомографии.

Программа ZondST2D предназначается для двумерной обработки и интерпретации профильных данных сейсмотомографии. Программа разбита на несколько основных модулей: модуль пикирования первых вступлений на сейсмограммах, модуль решения прямой и обратной задачи сейсмотомографии, модуль слоистой инверсии по методу КМПВ.

Обработка сейсморазведочных данных МОВ-ОГТ проводилась в специализированном программном пакете RadExPro Seismic Software. Данный программный продукт используют, как правило, при разведке на нефть. Для частных малоглубинных инженерных задач RadExPro подходит, но применяется гораздо реже. Производитель программы — ООО «Деко-геофизика СК», г. Москва.

Постановка задачи

Известно, что результаты инженерных сейсмических исследований в первую очередь требуются строителям на предпроектном этапе. Нередко возникает вопрос: «Для чего проводить исследование ВЧР на продольных и поперечных волнах?». Далее приведены лишь некоторые задачи, которые решают вышеописанные исследования:

1. Расчленение геологического разреза, уточнение скоростных характеристик грунтовых слоев, дальнейшее построение сейсмогеологических моделей для расчета приращения сейсмической интенсивности (проведение работ по сейсмическому микрорайонированию) [8, 10]. Данный вид работ позволяет уточнить вклад грунтовых условий в сейсмичность площадки строительства.

2. Определение скоростей продольных Vp и поперечных Vs волн, позволяющих судить о физико-механических свойствах грунтов [11, 12].

3. Сопоставление получаемых скоростных разрезов грунтовой толщи с результатами буровых работ в процессе инженерно-геологических исследований. Позволяет дополнить, уточнить, а порой и проверить геологические разрезы, представленные по точечным скважинам. Немаловажное значение имеет в районах вечной мерзлоты [13, 14].

4. Определение глубины залегания «условной скалы» необходимо для расчета сейсмического воздействия как на дневной поверхности, так и на глубине.

5. Площадное изучение грунтовой толщи, анализ отношения Vp/Vs и коэффициента Пуассона позволяют определить места разуплотнения грунта

[6, 15—19] или, наоборот, оконтурить предметы, находящиеся под землей. Например, подземные коммуникации, не отмеченные на плане, а также другие нарушения и/или неоднородности [20].

Автор в статье ставит задачу наглядно продемонстрировать возможности методов инженерных сейсмических исследований на практических примерах в различных геологических условиях.

Описание и обсуждение результатов

Геофизики-практики предлагают различные подходы для повышения качества обработки полевых данных: применение цифровой фильтрации и дифференцирования сейсмограмм [21], извлечение полезной информации о геологическом строении среды по вторичным и многократно отраженным волнам [22]. Данная статья предлагает к рассмотрению несколько конкретных практических примеров увеличения глубины изучения ВЧР методическими приемами: варианты залегания коренных пород на глубине до 10, 20 и более 100 м; разные грунтовые условия и способы возбуждения упругой волны. В ходе исследований на площадках с различными грунтовыми условиями применяются соответствующие методы для определения глубины залегания коренных пород [23, 24].

Пример 1. Г. Екатеринбург.

Вариант грунтовых условий, когда «скала» находится на глубине порядка 10 м, уровень грунтовых вод (УГВ) — 5—6 м. Метод МПВ (P-волны и S-волны).

Регистрация продольной волны ведется с помощью вертикальных геофонов СВ-10. В методе МПВ можно ограничиться измерением только продольной волны, ссылаясь на РСН 65—87. Но не стоит забывать о том, что в обводненном грунте продольные волны ведут себя по-разному. Если на скоростном разрезе Vp видна толща со скоростью 1500 м/с, то это скорость распространения продольной волны в воде. В таком случае недостаточно провести МПВ на продольных волнах. Для улучшения изучения слоистости обводненной среды необходимо добавлять МПВ на поперечных волнах. С данным типом волн трудности возникают как на этапе возбуждения сигнала, так и на этапе обработки. Метод «правых и левых ударов» позволяет зарегистрировать поперечную волну с разными «знаками», затем при помощи математической обработки одна сейсмограмма вычитается из другой. В результате получаем удвоенную амплитуду поперечной волны и практически отсутствие «волн-помех» (в данном случае — это поверхностная, акустическая и продольная волны). В некоторых сейсмических станциях присутствует неоспоримое преимущество: накопление сейсмограммы в процессе отбивания профиля с разными знаками накопления [25, 26]. Таким образом, не требуется дополнительная сложная математическая обработка. Достаточно обработать готовые сейсмограммы поперечных волн так же, как продольных: пикировка первых вступлений и построение годографов.

В процессе возбуждения поперечной волны на грунте достаточно сделать небольшое углубление (на штык лопаты) и производить удар параллельно дневной поверхности. Сложнее, когда предстоит работать на асфальте или бетоне. Вариант решения представлен на рис. 1. Конечно, всегда можно вскрыть необходимый участок твердого покрытия, но на действующих объектах

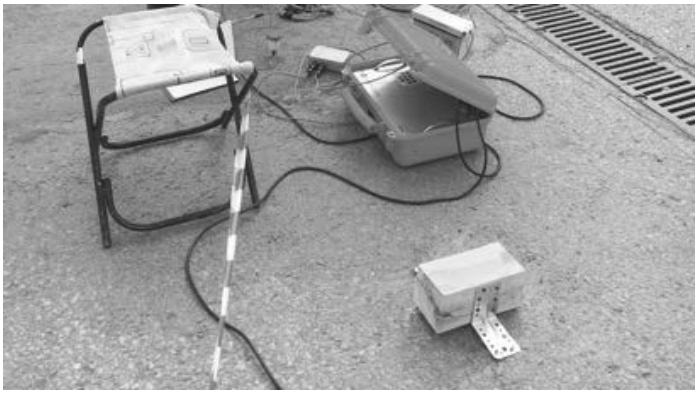

Рис. 1. Работы по профилю на асфальте
Fig. 1. Profile work on asphalt

вряд ли это возможно. Альтернативный способ возбуждения поперечной волны реализован с применением деревянного бруска, размером 150×150 мм в сечении, который крепится анкерами к асфальту при помощи металлических уголков. Удары в торец деревянной плашки слева и справа уверенно возбуждают поперечную волну. Регистрация поперечной волны ведется на горизонтальные геофоны GS-20.

На рис. 2 и 3 показаны скоростные разрезы на продольных Vp и поперечных Vs волнах соответственно — результат работы по асфальту. УГВ на профиле порядка 6 м. Видно, что из-за обводнения продольные волны показывают преломляющую границу на глубине, близкой к уровню грунтовых вод. Разрез на поперечных волнах не зависит от наличия воды в грунте и показывает границу, сопоставимую с данными литологических колонок.

Отдельно отметим, что на рис. 2—4 и рис. 6—7 значение скоростей указано в км/с и выделено цветами.

Длина косы (шаг между датчиками 2 м) 46 м, с выносами в 25 м с каждой стороны сейсмический профиль составляет 96 м. При такой расстановке глубина исследования — не более 20 м.

Пример 2. Свердловская область.

Вариант грунтовых условий, когда «скала» находится на глубине более 30 м, УГВ — 2—4 м. На уровне 10—30 м — плотные глины. Метод МПВ (Р-волны).

Стандартная расстановка в 46 м, шаг между датчиками 2 м. Дневная поверхность — грунт, трудностей с установкой датчиков не возникает. Задача состоит в том, чтобы «пробить» толщу до 30 метров.

Для решения поставленной задачи увеличивается вынос с каждой стороны с 25 м (одинарный вынос) до 49 м (двойной), а также изменяется сила источника сигнала, применяется кувалда весом 10 кг.

Исследование проведено только на продольных волнах, и первая преломляющая граница выделена на уровне двух метров (это уровень УГВ). Вторая граница прослеживается на уровне восьми метров, она соотносится с геологической структурой, представленной литологическими колонками по двум скважинам (рис. 4). Стоит отдельно отметить, что в природе не встречаются ровные и четкие границы, как показано на блоковой модели (рис. 4). Это лишь условное обозначение границы контрастных

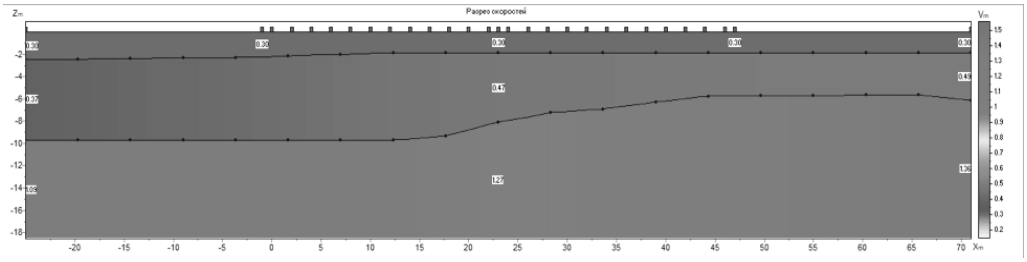

Рис. 2. Разрез по продольным волнам (блоковая модель). Профиль по асфальту
Fig. 2. P-wave section (block model). Asphalt profile

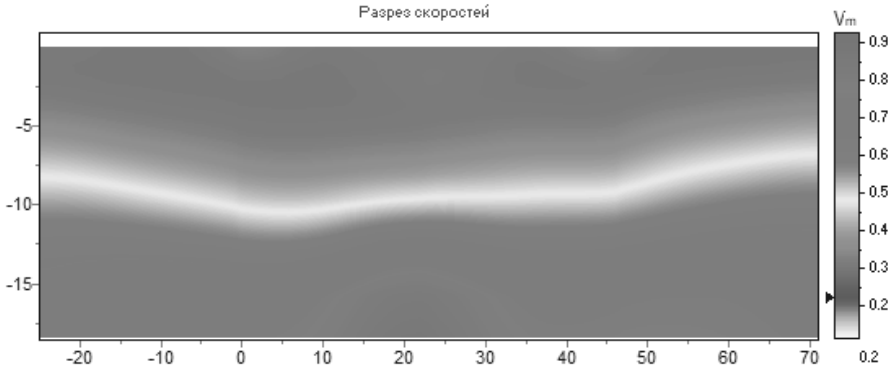

Рис.3. Разрез по поперечным волнам (сглаженная модель). Профиль по асфальту
Fig. 3. S-wave section (smoothed model). Asphalt profile

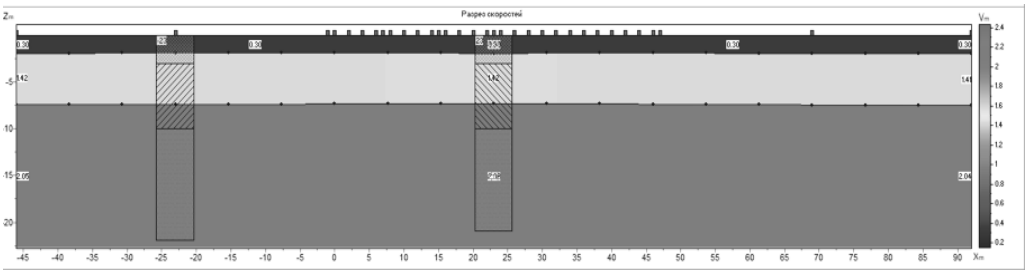

Рис. 4. Скоростной разрез по продольным волнам. Профиль по грунту
Fig. 4. P-wave section. Ground profile

слоев. В реальности этот контакт представлен зоной перехода с градиентом характеристик (скорости, плотности).

Когда скоростной разрез по продольной волне «бьётся» с геологическими данными, и нет четкой задачи провести полное исследование на обоих типах волн, тогда нет причин дополнительно проводить исследование на поперечных волнах.

На рис. 4 показана длина сейсмического профиля в 144 м (расстояние в метрах по оси абсцисс). При такой расстановке глубина исследования составляет 25 м (расстояние в метрах по оси ординат).

Пример 3. Г. Барнаул.

Вариант грунтовых условий, когда «скала» находится на глубине более

100 м, УГВ — 5 м. На уровне 50 м — плотные глины. До отметки в 50 м — пески и суглинки. Метод МПВ (P-волны и S-волны). Метод МОВ-ОГТ.

На первом этапе при рекогносцировке стало понятно, что работы предстоят на асфальтированной набережной реки Обь. Было достигнуто соглашение с заказчиком работ, что до проведения сейсмических исследований будет вскрыт асфальт на протяжении всего профиля (см. рис. 5). Это позволило избежать дополнительных трудностей при работе на твердых покрытиях. Также на рис. 5 видны источники сигнала: при работе с продольными волнами — кувалда 16 кг, для поперечных волн — деревянная киянка. Увеличение веса кувалды вызвано необходимостью пробивать отметку в 50 м и более.

На следующем этапе изучения геологических данных, предоставленных по нескольким скважинам (по 54 м), был проведен анализ геологических разрезов: толща песка составляет до 30 м, суглинки около 20 м, ниже отметки 50 м располагаются твердые глины. Скоростные разрезы по факту проведения работ МПВ приведены на рис. 6 и 7. Для того, чтобы стало возможным исследование глубже 25 м, была заменена сейсмическая коса: шаг между датчиками увеличен до 5 м.

Рис. 5. Траншея по профилю. Оборудование
Fig. 5. Trench along the profile. Equipment

На рис. 6 явно просматривается влияние обводненных грунтов — ниже отметки 10 м скорость продольной волны становится постоянной и равной 1500 м/с (распространение продольной волны в воде). На рис. 7 поперечные волны описывают реальную картину, сопоставимую с геологическими данными: пески и суглинки имеют схожие скоростные характеристики. При помощи наложения литологических колонок на скоростной разрез наглядно показано, что сейсмогеологический слой может состоять из нескольких геологических слоев.

На глубине порядка 35—45 м прослеживается граница с твердыми глинами. Но этого по-прежнему недостаточно для того, чтобы уверенно говорить о найденной кровле коренных пород.

На обоих рисунках длина сейсмического профиля порядка 230 м и глубина исследования до 45 м.

Анализируя архивные геологические данные, предположим, что глубина «скалы» в данном регионе находится на уровне 100 м. Для решения инженерных сейсмических задач на глубине более 50 м подходит МОВ-ОГТ [23]. Данный метод используется при глубинной разведке на нефть и газ с применением многоканальных сейсмических станций и мощных вибрационных источников упругой волны, а также при работах на акваториях [27].

Два профиля ОГТ располагаются на месте профиля МПВ (рис. 6—7). Местоположение первого канала по профилю МПВ совпадает с первым каналом первого профиля ОГТ. Шаг между приемниками составляет 2 м, длина размотки — 46 м. С тем, чтобы была возможность объединить оба профиля в один, первый канал второго профиля устанавливается через 2 м после 24-го канала первого профиля.

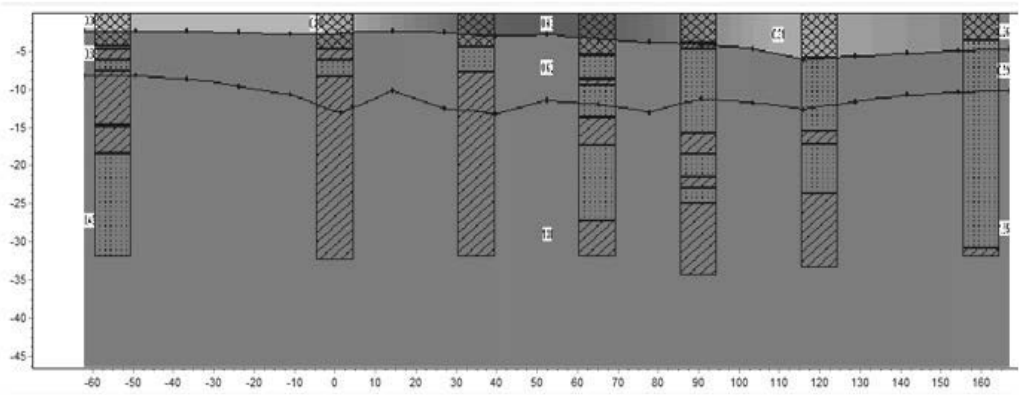

Рис. 6. Скоростной разрез по продольным волнам
Fig. 6. P-wave section

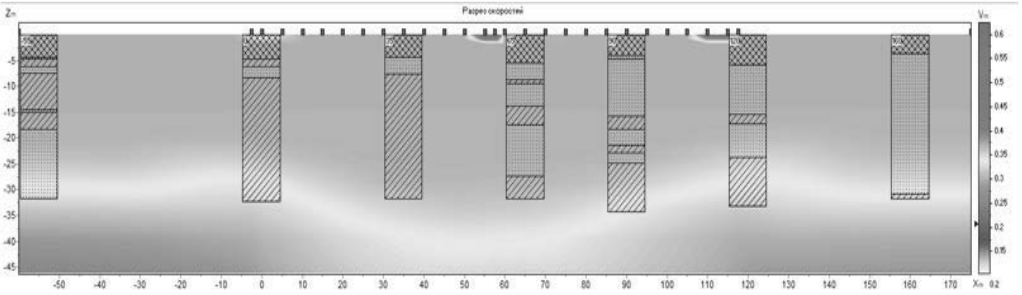

Рис. 7. Скоростной разрез по поперечным волнам
Fig. 7. S-wave section

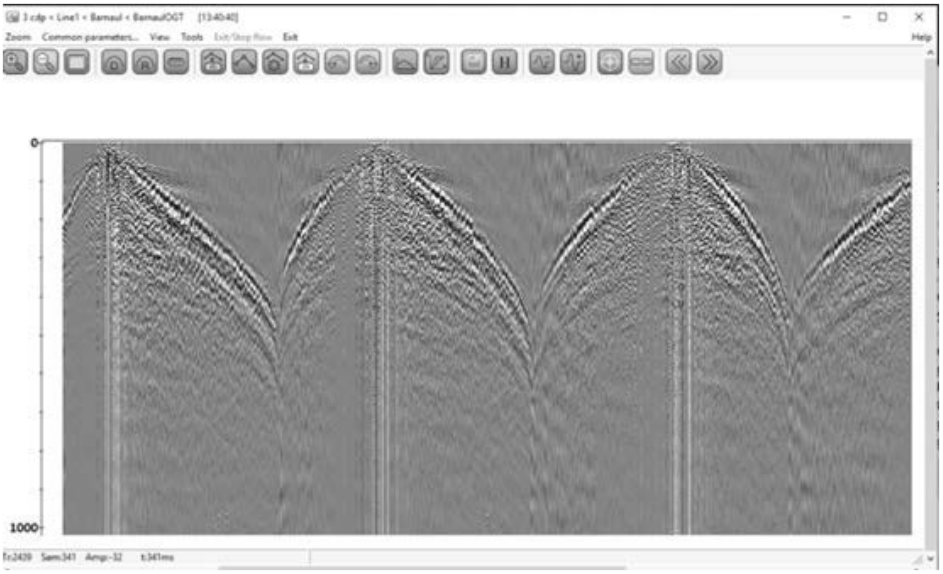

Рис. 8. Суперсейсмограмма первого профиля
Fig. 8. Superseismogram of the first profile

На каждый профиль произведено 36 ударов, а именно по 12 ударов выносных (справа/слева от косы) и 12 ударов по косе, с шагом 4 м.

После загрузки данных в RadExPro (36 сейсмограмм по первому профилю) и построения геометрии системы наблюдения строится так называемая суперсейсмограмма (рис. 8). На изображении прослеживаются годографы отраженных волн (гиперболы).

После совместной обработки обоих профилей, скоростного анализа, фильтрации и ввода кинематических поправок рассчитывается глубинный разрез (рис. 9). На рисунке просматривается структурное изменение на глубине около 50 м, которое соответствует переходу суглинки-глина. Также следующий горизонт виден на глубине 80—100 м. Предположительно, это кровля коренных пород.

Для контроля и проверки полученных результатов эксперимент проведен повторно, местоположение профилей неизменно, шаг между датчиками 2 м. В ходе повторного эксперимента для получения более четкого итогового глубинного разреза шаг между пунктами возбуждения выбран в два раза чаще: не 4 м, а 2 м.

В результате повторного эксперимента были получены данные, уточняющие структуру грунта на глубину до 100 метров (рис. 10). На отметке 80—100 метров прослеживается граница с более плотным грунтом, который характеризуется увеличением скорости отраженной волны.

Выводы

Для увеличения глубины инженерных сейсмических исследований МПВ необходимо увеличивать расстояние выноса, шаг между пунктами приема, тип и/или мощность источника сигнала:

– при стандартной расстановке в 46 м, с одинарным выносом, глубина исследования составляет 15—17 м. Источник сигнала — кувалда 5 кг;

– при стандартной расстановке с выносом 48 м — до 20—30 м. Источник сигнала — кувалда 10 кг;

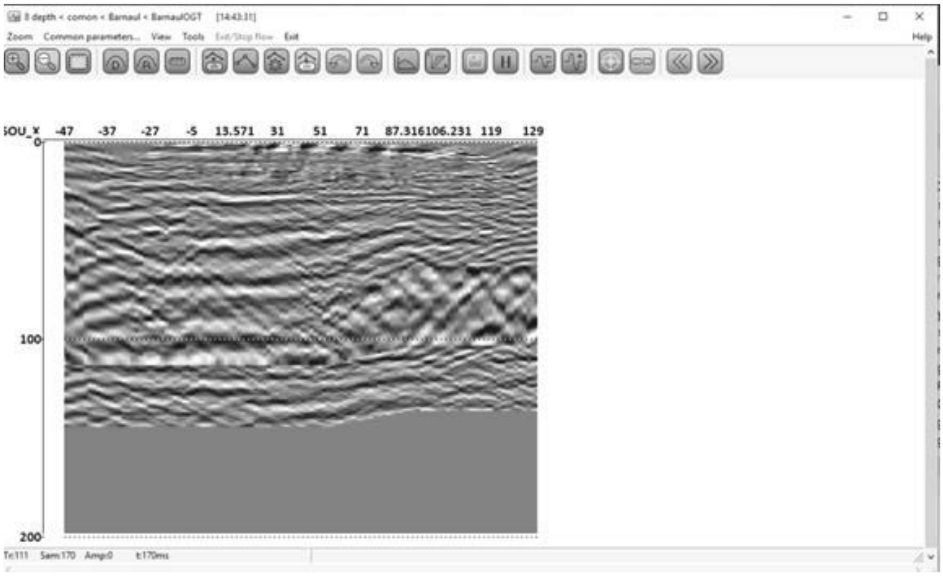

Рис. 9. Глубинный разрез по двум профилям
Fig. 9. Depth section along two profiles

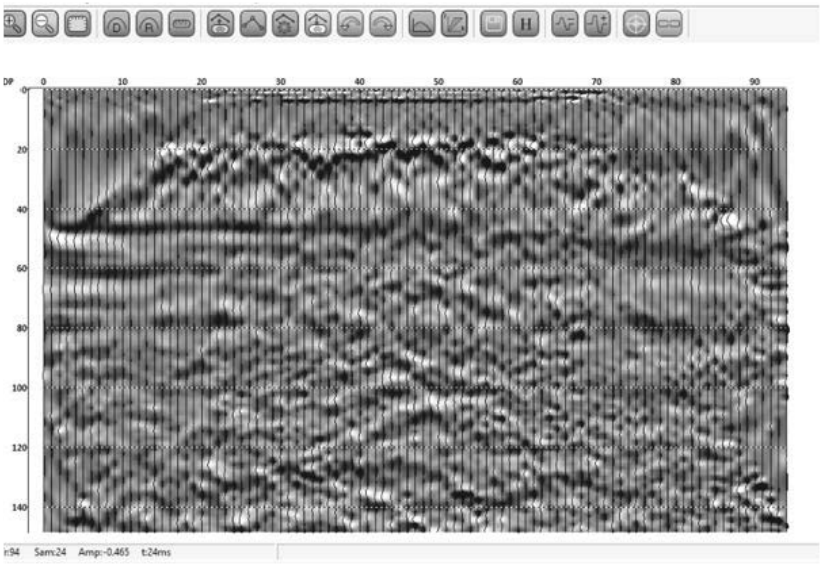

Рис. 10. Повтор эксперимента. Глубинный разрез
Fig. 10. Repeat the experiment. Depth section

– при увеличении шага между датчиками до 5 м глубина исследования возрастет до 50 м. Источник сигнала — кувалда 16 кг.

Отдельно отметим, что в рассмотренных примерах возможности инженерных сейсмических исследований методом МПВ ограничены по глубине из-за применения кувалды в качестве источника упругих колебаний. Применение более мощных источников возбуждения упругой волны (пневматические, газоразрядные и т. д.) позволит расширить диапазон глубин исследований.

Для определения глубины залегания кровли коренных пород (или условной «скалы») глубже 50 м применяется МОВ-ОГТ. Данный метод более трудоемкий за счет увеличения пунктов возбуждения сигнала, а также за счет сложности обработки данных. Тем не менее, в результате, используя стандартную сейсмическую косу (46 м) с шагом в 2 м, МОВ-ОГТ позволяет уточнить структуру ВЧР на глубину до 100 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Павлова В. Ю.*, *Соловьев В. А.*, *Кокорева А. С.* Опыт работы с прибором георадар «ОКО-250» для уточнения грунтовых условий на озерновской косе Култучного озера (город Петропавловск-Камчатский) // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. — 2021. — Т. 35. № 2. — С. 110—119. ISSN 2079—6641.
2. *Nuzhdin L. V.*, *Mikhaylov V. S.*, *Voskresenskiy M. N.* Methods for subsoil modelling under dynamic impacts and multicomponent damping in SCAD FEA Software with geophysical monitoring // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis. — 2020. — Series 1425 (2020) 012096. DOI:10.1088/1742—6596/1425/1/012096.
3. *Горшков В. Ю.* Определение причин просадки земной поверхности в восточной части пос. Садовый // Уральский геофизический вестник. — 2021. — № 2 (44). — С. 16—20.

4. *Давыдов В. А.*, *Арзамасцев Е. В.*, *Байдиков С. В.*, *Горшков В. Ю.* Электрометрические исследования на Крылатовском руднике // Известия вузов. Горный журнал. — 2019. — № 3. С. 64—71. DOI: 10.21440/0536—1028—2019—3-64—71.

5. *Давыдов В. А.* Применение малоглубинной сейсморазведки для изучения подработанных территорий // Известия вузов. Горный журнал. — 2010. — № 4. — С. 111—116.

6. *Сенин Л. Н.*, *Сенина Т. Е.* Инструментальные данные малоглубинной сейсморазведки в расчетах сейсмических жесткостей при сейсмическом микрорайонировании // Уральский геофизический вестник. — 2020. — № 4 (42). — С. 29—35.

7. *Захарченко Е. И.*, *Рудомаха Н. Н.*, *Захарченко Ю. И.*, *Андрейко Н. Г.* Инженерные геофизические исследования на площадке изысканий в северной части г. Краснодара // Булатовские чтения: сб. науч. ст. — 2021. — С. 54—57.

8. *Романов В. В.*, *Гапонов Д. А.* Применение инженерной сейсморазведки при изучении грунтовых вод в глинистых грунтах // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2014. — № 6. — С. 52—59.

9. *Турчков А. М.* Метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки в инженерной сейсморазведке // Технологии сейсморазведки. — 2013. — № 2. — С. 98–111.

10. *Кириченко М. А.*, *Любимова Т. В.*, *Пендин В. В.* Основы сейсмического микрорайонирования территорий со сложными инженерно-геологическими условиями (на примере Черноморского побережья северо-западного Кавказа // Известия вузов. Геология и Разведка. — 2017. — № 1. — С. 60—66.

11. *Fkirin M. A.*, *Badawy S.*, El deery MF. Seismic Refraction Method to Study Subsoil Structure // J Geol Geophys. — 2016. no. 5. — pp. 259—265 Fkirin MA, Badawy S, El deery MF. Seismic Refraction Method to Study Subsoil Structure // J Geol Geophys. — 2016. no. 5. — pp. 259—265. DOI:10.4172/2381—8719.1000259.

12. Mundher Mohammed Alsamarraie. The Application of the Seismic Method in Site Properties Assessment // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — no. 1892. — pp. 1—9. DOI:10.1088/1742—6596/1892/1/012025.

13. *Трапезников В. С.*, *Малеев Д. Ю.*, *Квашук С. В.* Решение совместной кинематической задачи по определению сложной конфигурации кровли многолетней мерзлоты методами преломленных и отраженных волн // Проектирование развития региональной сети железных дорог. — 2017. — № 5. — С. 111—118.

14. *Нерадовский Л. Г.* Ошибки распознавания по скорости распространения сейсмической волны геологической природы слоёв в мёрзлых четвертичных отложениях долины реки Лены // Научный альманах. — 2021. — № 2—1 (76). — С. 72—78.

15. *Mfoniso U. A.*, *Okechukwu E. A.*, *Johnson C. I.*, *Mboutidem D. D.* Assessing the susceptibility of structural collapse using seismic refraction method // Earth Sciences Malaysia (ESMY). — 2020. — № 4(2). — pp. 140—145. http://doi.org/10.26480/esmy.02.2020.140.145

16. Arif Ismul Hadi, *Kirbani S.* Brotopuspito, Subagyo Pramumijoyo, *Hary C.* Hardiyatmo. Determination of Weathered Layer Thickness Around the Landslide Zone using the Seismic Refraction Method // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — № 830. — pp. 1—11.

17. *Diaconu A.*, *Chitea F.* Assessing hazardous geological features for tunnel construction by means of geotechnical and geophysical methods // 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM. Albena, Bulgaria, 2 — 8 July 2018.

18. Sudipta Bhowmick. Role of Vp/Vs and Poisson's Ratio in the Assessment of Foundation(s) for Important Civil Structure(s) // Geotech Geol Eng. — 2017. — № 35. — pp. 527–534.

19. Lianqing Zhou, Cuiping Zhao, Jun Luo, Zhangli Chen. A Detailed Insight into Fluid Infiltration in the Three Gorges Reservoir Area, China, from 3D Vp, Vp/Vs, Qp, and Qs

Tomography // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2018. — vol. 108. — № 5B. — pp. 3029–3045. DOI:10.1785/0120170361.

20. *Ломтев В. Л.*, *Патрикеев В. Н.* Сейсмические признаки активных разломов Северного Сахалина // Геосистемы переходных зон. — 2017. — № 1 (1). — С. 37—48.

21. *Романов В. В.* Возможности повышения разрешенности сейсмограмм метода преломленных волн (МПВ) // Технологии сейсморазведки. — 2013. — № 4. — С. 67—73.

22. *Крылатков С. М.*, *Крылаткова Н. А.*, *Крылевская А. Н.*, *Гуськова В. Д.* Сейсмические изображения геологической среды в методе преломленных волн // Фундаментальные исследования. — 2015, — № 2. — С. 5409—5415.

23. *Шерифф Р.*, *Гелдарт Л.* Сейсморазведка. Обработка и интерпретация данных. — М: Мир, 1987. — 400 с.

24. *Телегин А. Н.* Сейсморазведка методом преломленных волн. — СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2004. — 187 с.

25. *Сенин Л. Н.*, *Сенина Т. Е.* Сейсмическая станция «Синус» // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — № 5. — С. 163—164.

26. *Сенин Л. Н.*, *Сенина Т. Е.* Многоканальная сейсмическая станция «Синус» с использованием двухпроцессорной системы управления и обработки // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2020. — № 7. — С. 24—32.

27. *Верпаховская А. О.*, *Пилипенко В. Н.*, *Пилипенко Е. В.* Формирование изображения глубинного геологического строения по данным морской сейсморазведки МОВ и МПВ // Геофизический журнал. — 2017. — № 6, Т 39. — С. 106—121. ГИАБ

REFERENCES

1. Pavlova V. Yu., Solov'ev V. A., Kokoreva A. S. Features of operating the instrument georadar "OKO-250" for refining the ground conditions on the ozernoVskaya kosa Kultuchnogo lake (PetropavloVsk-Kamchatsky city). *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2021, T. 35, no. 2., pp. 110—119. ISSN 2079—6641. [In Russ].

2. Nuzhdin L. V., Mikhaylov V. S., Voskresenskiy M. N. Methods for subsoil modelling under dynamic impacts and multicomponent damping in SCAD FEA Software with geophysical monitoring. *Journal of Physics*: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis. 2020. Series 1425 (2020) 012096. DOI:10.1088/1742—6596/1425/1/012096.

3. Gorshkov V. Yu. Determination of the causes of lowering of the earth's surface in the eastern part of the suburb Sadovyy. *Ural'skij geofizicheskij vestnik*. 2021, no. 2 (44), pp. 16—20. [In Russ].

4. Davydov V. A., Arzamascev E. V., Bajdikov S. V., Gorshkov V. Yu. Electrometric studies in KrylatoVskii mine. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2019, no. 3, pp. 64—71. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536—1028—2019—3-64—71.

5. Davydov V. A. Application of shallow seismic prospecting to study underworked areas, izvestiya vuzov. *Gornyy zhurnal*. 2010, no. 4, pp.111—116. [In Russ]

6. Senin L. N., Senina T. Ye. Instrumental data of low-depth seismic survey in calculations of seismic rigidity in seismic microzoning. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*. 2020, no. 4 (42), pp. 29—35. [In Russ].

7. Zakharchenko Ye. I., Rudomakha N. N., Zakharchenko Yu. I. Andreyko N. G. Engineering geophysical research at the survey site in the northern part city of Krasnodar, *BulatoVskiye chteniya:* sb. nauch. st. 2021, pp. 54—57. [In Russ].

8. Romanov V. V., Gaponov D. A. The use of engineering seismic in the study of groundwater in clay soils. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki*. 2014, no. 6, pp. 52—59. [In Russ]

9. Turchkov A. M. Reflection seismic for engineering applications. Tekhnologii sejsmorazvedki. 2013, no. 2, pp. 98–111. [In Russ]

10. Kirichenko M. A., Lyubimova T. V., Pendin V. V. The bases of seismic microzoning of the territories with difficult engineering-geological conditions (on the example of the Black sea coast of north-west Caucasus). *Izvestiya vuzov. Geologiya i Razvedka*. 2017, no. 1, pp. 60 — 66. [In Russ].

11. Fkirin M. A., Badawy S., El deery MF. Seismic Refraction Method to Study Subsoil Structure. J Geol Geophys. 2016. no. 5. pp. 259 — 265 Fkirin MA, Badawy S, El deery MF. Seismic Refraction Method to Study Subsoil Structure. J Geol Geophys. 2016. no. 5. pp. 259 — 265. DOI:10.4172/2381 — 8719.1000259.

12. Mundher Mohammed Alsamarraie. The Application of the Seismic Method in Site Properties Assessment. Journal of Physics: Conference Series. 2021. no. 1892. pp. 1 — 9. DOI:10.1088/1742 — 6596/1892/1/012025.

13. Trapeznikov V. S., Maleyev D. Yu., Kvashuk S. V. Solution of the joint kinematic problem of determining the complicated configuration of the surface of permafrost by the methods of refracted and reflected waves. *Proyektirovaniye razvitiya regional'noy seti zheleznykh dorog*. 2017, no. 5, pp. 111 — 118. [In Russ].

14. Neradovskiy L. G. Errors in recognizing the geological nature of layers in frozen Quaternary sediments of the Lena River valley by the seismic wave propagation velocity. *Nauchnyy al'manakh*. 2021, no. 2 — 1 (76), pp. 72 — 78. [In Russ].

15. Mfoniso U. A., Okechukwu E. A., Johnson C. I., Mboutidem D. D. Assessing the susceptibility of structural collapse using seismic refraction method. *Earth Sciences Malaysia (ESMY)*. 2020. no. 4(2). pp. 140 — 145. http:. doi.org/10.26480/esmy.02.2020.140.145.

16. Arif Ismul Hadi, Kirbani S. Brotopuspito, Subagyo Pramumijoyo, Hary C. Hardiyatmo. Determination of Weathered Layer Thickness Around the Landslide Zone using the Seismic Refraction Method. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. no. 830. pp. 1 — 11.

17. Diaconu A., Chitea F. Assessing hazardous geological features for tunnel construction by means of geotechnical and geophysical methods. 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM. Albena, Bulgaria, 2 8 July 2018.

18. Sudipta Bhowmick. Role of Vp/Vs and Poisson's Ratio in the Assessment of Foundation(s) for Important Civil Structure(s). Geotech Geol Eng. 2017. no. 35. pp. 527–534.

19. Lianqing Zhou, Cuiping Zhao, Jun Luo, Zhangli Chen. A Detailed Insight into Fluid Infiltration in the Three Gorges Reservoir Area, China, from 3D Vp, Vp/Vs, Qp, and Qs Tomography. Bulletin of the Seismological Society of America. 2018. vol. 108. no. 5B. pp. 3029–3045. DOI:10.1785/0120170361.

20. Lomtev V. L., Patrikeyev V. N. Seismic signatures indicators of North Sakhalin active faults. *Geosistemy perekhodnykh zon*. 2017, no. 1 (1), pp. 37 — 48. [In Russ].

21. Romanov V. V. Improving resolution of seismic refraction method. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2013, no. 4, pp. 67 — 73. [In Russ].

22. Krylatkov S. M., Krylatkova N. A., Krylevskaya A. N., Gus'kova V. D. Seismic images of geological environment in refraction method. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2015, no. 2, pp. 5409 — 5415. [In Russ].

23. Sheriff R., Geldart L. Seismic exploration. Data processing and interpretation. M: Mir, 1987. 400 p. [In Russ].

24. Telegin A. N. *Refracted seismic survey* [Sejsmorazvedka metodom prelomlennyh voln]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPb. un-ta. 2004. 187 p. [In Russ].

25. Senin L. N., Senina T. Ye. Seismic station "Sinus". *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2005, no. 5, pp. 163 — 164. [In Russ].

26. Senin L. N., Senina T. Ye. Multichannel seismic station “Sinus” using a two-processor control and processing system. *Promyshlennyye ASU i kontrollery*. 2020, no. 7, pp. 24—32. [In Russ]

27. Verpakhovskaya A. O., Pilipenko V. N., Pilipenko Ye. V. Formation geological depth image according to refraction and reflection marine seismic data. *Geofizicheskiy zhurnal*. 2017, no. 6, T. 39, pp. 106—121. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воскресенский Михаил Николаевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии, ORCID 0000-0002-6222-7265, Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральское отделение Российской Академии Наук (УрО РАН), 620016, Екатеринбург, Амундсена, д. 100, Россия, Voskresenskiy.mn@gmail.com.
Для контактов: *Воскресенский Михаил Николаевич*, Voskresenskiy.mn@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Voskresenskiy M. N., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Seismometry, ORCID 0000-0002-6222-7265, Institute of Geophysics. Yu.P. Bulashevich Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (UB RAS), 620016, Yekaterinburg, Amundsen, 100, Russia, Voskresenskiy.mn@gmail.com.
For contacts: *Voskresenskiy M. N.*, e-mail: Voskresenskiy.mn@gmail.com.

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 15.03.2022; принята к печати 10.04.2022.
Received by the editors 01.11.2021; received after the review 15.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.