

Совместное применение наземных сейсмических методов в инженерных исследованиях

М. Н. Воскресенский, Е. А. Косорогова, А. А. Курданова, Г. И. Парыгин

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, e-mail: igfuroran@mail.ru

Поступила в редакцию 01.08.2024 г., принята к печати 11.12.2024 г.

Объект исследования. Верхняя часть геологического разреза (зона малых скоростей). *Цель.* Продемонстрировать на практике совместное применение двух сейсмических методов (активного и пассивного) для определения глубины залегания кровли коренных пород и наличия структурных изменений в грунтовой толще. *Материалы и методы.* Перед геофизическими методами при инженерных исследованиях, как правило, стоит задача определить глубину и рельеф залегания скальных пород. Конечно, это не единственная задача, но одна из самых востребованных. Из всего многообразия геофизических методов для решения поставленной задачи самые информативные и мобильные – это сейсмические. В данной работе авторы сопоставляют результаты совместного использования и интерпретации метода преломленных волн и метода регистрации микросейсм в различных геологических условиях. Это два принципиально разных сейсмических наземных метода. Метод преломленных волн является активным и имеет источник упругих колебаний, метод регистрации микросейсм – пассивный, регистрирует окружающий фон микросейсмических колебаний естественного и искусственного происхождения. На исследуемых площадках выбрано по одному профилю, на которых построены скоростные разрезы по продольным V_p и поперечным V_s волнам. Проведена регистрация микросейсмического фона в нескольких точках, рассчитана спектральная плотность мощности скорости смещения и кривая спектральных соотношений. Зная скорость поперечных волн в рыхлом слое, используем формулу пересчета из частотной области (передаточная характеристика Накамуры) в глубину. Таким образом, в точках наблюдения микросейсм может быть вычислена и прослежена глубина контрастных по акустической жесткости границ. *Результаты.* На разных грунтовых условиях показана корреляция между скоростными разрезами по поперечным волнам и результатом обработки микросейсм методом Накамуры. *Выводы.* Дополнение классического метода преломленных волн данными метода регистрации микросейсм позволяет с большей уверенностью судить о структурных особенностях верхней части геологического разреза.

Ключевые слова: метод преломленных волн, инженерные изыскания, сейсмические волны, продольные волны, поперечные волны, микросейсмические колебания, метод HVSR, метод Накамуры

Combined application of land seismic methods in engineering research

Mikhail N. Voskresenskiy, Elena A. Kosorotova, Alena A. Kurdanova, Gennadii I. Parygin

Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, UB RAS, 100 Amundsen st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: igfuroran@mail.ru

Received 01.08.2024, accepted 11.12.2024

Research subject. The upper part of a geological section (low-velocity layer). *Aim.* To demonstrate the feasibility of combining two seismic methods (active and passive) for determining the depth of bedrock roof and the presence of structural changes in the soil layer. *Materials and methods.* Geophysical methods in engineering studies are faced, as a rule, with the task of determining the depth and relief of rock occurrence. This task, although not being the sole one, is of particular importance. Among the variety of geophysical methods, seismic methods are the most informative and mobile. In this article, we compare the results of a combined application of the methods of refracted waves and microseismic sounding in different geological conditions. These are two basically different land seismic methods. The former method is active and has a source of elastic vibrations. The latter method is passive and records natural- and artificial-origin surrounding background microtremor. At each of the sites under study, one profile was selected, on which sections were built along P-waves V_p and S-waves V_s . The microtremor was recorded at several points, along with calculation of the spectral power density of the displacement rate and the spectral ratio curve. Given the rate of shear waves in the loose layer,

Для цитирования: Воскресенский М.Н., Косорогова Е.А., Курданова А.А., Парыгин Г.И. (2025) Совместное применение наземных сейсмических методов в инженерных исследованиях. *Литосфера*, 25(3), 664-673. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-664-673>. EDN: DAPNWA

For citation: Voskresenskiy M.N., Kosorotova E.A., Kurdanova A.A., Parygin G.I. (2025) Combined application of land seismic methods in engineering research. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 664-673. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-664-673>. EDN: DAPNWA

© М.Н. Воскресенский, Е.А. Косорогова, А.А. Курданова, Г.И. Парыгин, 2025

a conversion formula from the frequency domain (Nakamura transfer characteristic) to depth is used. Thus, at the observational points of microseisms, the depth of boundaries contrasting in acoustic rigidity can be calculated and traced. *Results.* On the example of different soil conditions, the correlation between velocity cross-sections and Nakamura microseism results is shown. *Conclusions.* The combination of the classical refracted wave method and microseismic sounding provides a more detailed information on the structural features of the upper part of a geological section.

Keywords: *refracted wave method, engineering surveys, seismic waves, P-waves, S-waves, microtremor, HVSR method, Nakamura method*

ВВЕДЕНИЕ

В инженерных исследованиях одна из основных задач наземных геофизических методов – это получение информации о свойствах геологической среды, находящейся между пробуренными скважинами. Геофизические методы отличаются друг от друга регистрацией и анализом различных по своей природе физических полей искусственного и естественного происхождения.

Часто возникает необходимость получения данных с минимальным количеством геологических данных или без проведения инженерно-геологических исследований (далее – ИГИ), когда объект находится в труднодоступных местах. В таком случае может помочь применение различных наземных сейсмических методов.

МЕТОДЫ

Один из самых распространенных наземных сейсмических методов – это метод преломленных волн (далее – МПВ). Применяется для определения глубины залегания и рельефа кровли коренных пород (Давыдов, 2019; Бобров, Герасимова, 2021; Hunter et al., 2022). МПВ применим одинаково эффективно как в городской среде (Воскресенский, 2022), так и в полевых условиях (Турчков и др., 2021). Техногенные помехи (территории городов, линии электропередач и др.), безусловно, мешают проведению работ, однако существуют методические, а также программные подходы (при обработке полученных данных) для повышения отношения сигнал/шум (Романов, 2013). Для получения более подробной информации о свойствах грунтов необходимо проведение исследования на продольных V_p и поперечных V_s волнах. В некоторых случаях требуется изучение анизотропии свойств грунта в зависимости от азимута профилей (Герасимова, 2021 2020; Яскевич и др., 2021). Получая вертикальные 2D скоростные разрезы, можно определить уровень грунтовых вод (Давы-

дов, 2021), мощность рыхлых грунтов и наличие структурных нарушений (Горбатиков и др., 2008; Vargemezis et al., 2019).

МПВ является активным методом, поскольку применяется излучатель (источник упругих колебаний). В инженерной сейсморазведке также успешно применяется пассивный метод регистрации микросейсмических колебаний. Система наблюдения не предполагает активных воздействий на окружающую среду, датчики регистрируют фон, состоящий из множества упругих колебаний от разных источников (эндогенных и техногенных). Существует несколько подходов к анализу микросейсм: метод микросейсмического зондирования (Горбатиков и др., 2008; Горбатиков, Цуканов, 2019), метод стоячих волн (Федин и др., 2020), HVSR метод (horizontal to vertical spectral ratio, метод спектральных отношений) и пр. В данной работе применяется метод Накамуры (Nakamura, 2019). Этот метод зарекомендовал себя в последнее время как источник дополнительной полезной информации при интерпретации данных основных методов сейсморазведки (Плотников, Черкашнев, 2021; Биряльцев и др., 2021; Яблоков и др., 2023, Hellel et al., 2019).

Метод преломленных волн, как и любой другой наземный геофизический метод, не может дать однозначный достоверный результат по определению глубины и рельефа контрастных границ. Всегда присутствует неопределенность в процессе проведения полевых работ (гетерогенность среды, неравномерная установка пунктов приема, случайные помехи, наведенные на регистрирующей аппаратуре), а также некоторые допущения в камеральной обработке. Учет результатов обработки микросейсм при интерпретации данных МПВ полезен для снижения уровня неопределенности, вызванной описанными факторами.

Метод регистрации микросейсм полезен в случае, когда изучаемая площадка находится в труднодоступных местах. Анализ записей микросейсм по профилю может показать наличие аномальных

зон, которые характеризуются изменением формы кривой спектральных отношений. За счет разграничения зон равномерных и аномальных HVSR характеристик возможно уменьшение количества профилей МПВ. Совместное применение различных сейсмических методов направлено на более качественный анализ структуры и свойств верхней части геологического разреза (далее – ВЧР). Приведенное ниже исследование описывает совместное проведение и интерпретацию данных МПВ и метода регистрации микросейсм для различных грунтовых условий.

ОПИСАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведем **первый пример** – результаты ИГИ площадки в Челябинской области. По данным ИГИ, коренные породы залегают на глубине 4.8 м (рис. 1).

На рис. 2б показан результат МПВ – разрез по поперечным волнам (программа ZondST, автор А.Е. Каминский). На рис. 2а изображены годографы на каждом пункте возбуждения. Контрастная граница по Vs прослеживается по профилю на глубине 5–7 м.

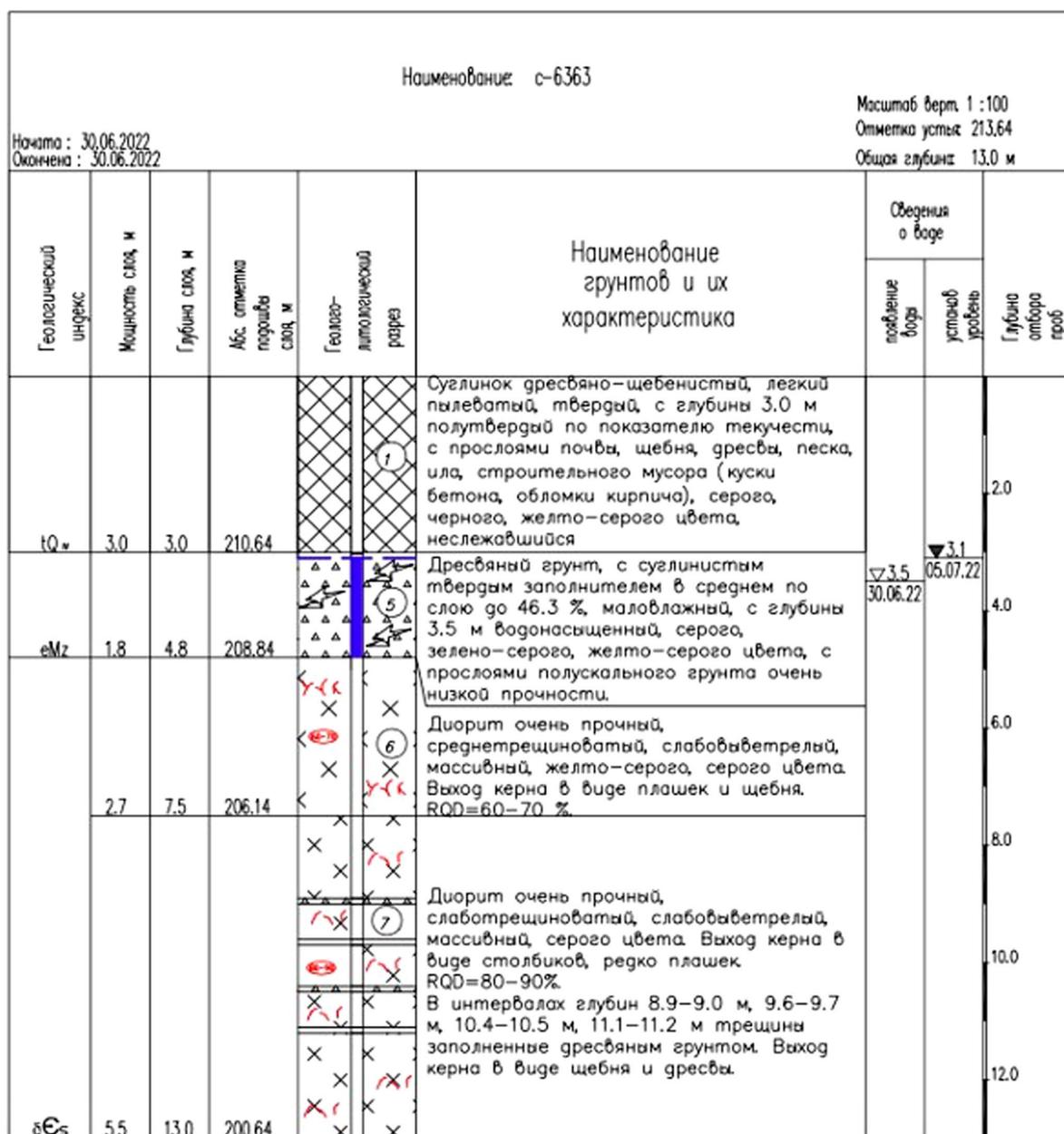


Рис. 1. Геолого-литологический разрез по скважине на профиле (соответствует местоположению канала № 2).

Fig. 1. Geological-lithological section along the well on the profile (corresponds to the location of channel No. 2).

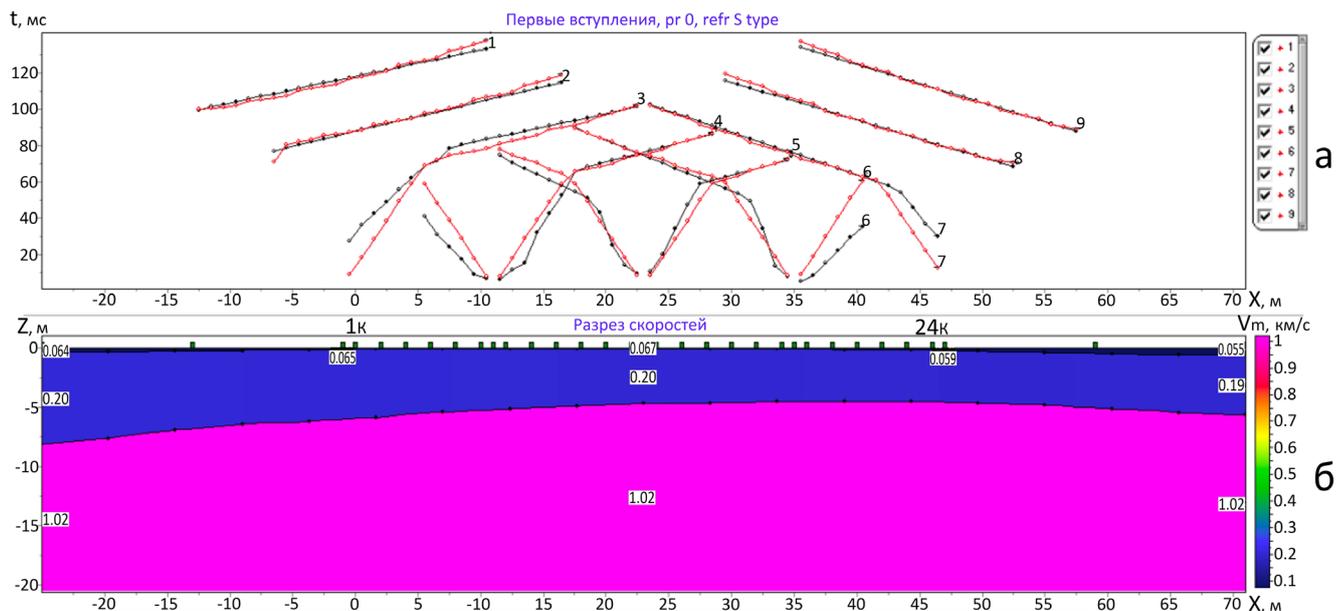


Рис. 2. Годографы (а) и скоростной разрез по поперечным волнам Vs (б).

а. Красные линии – модель, черные линии – наблюдаемый годограф; t – время.
 б. Vs – пластовая скорость; градиент цвета – это диапазон изменения скорости; черные цифры в слое – значение скорости в км/с; X – расстояние (расстановка косы 24-го канала длиной 46 м, слева и справа от косы вынос по 25 м), Z – глубина от планировочной отметки.

Fig. 2. Hodographs (a) and transverse wave velocity section Vs (б).

а. Red lines are the model, black lines are the observed hodograph; t is the time.
 б. Vs is the reservoir velocity; the color gradient is the speed range; the black numbers in the layer are the speed value in km/s; X is the distance (the arrangement of the channel 24 spit, 46 m long, 25 m each to the left and right of the spit), Z is the depth from the planning mark.

Полевые работы по методу преломленных волн выполнены на инженерной сейсмической 24-канальной станции “Синус” (Сенин, Сенина, 2005).

На концах сейсмической косы на данном профиле в двух точках зарегистрированы микросейсмические колебания, длительность записи – по 15 мин. Для регистрации упругих колебаний использован комплект из трехканального сейсмического регистратора Reftek DAS-130 и велосиметра Le-3d-lite (напряжение на выходе датчика пропорционально скорости смещения). Частота дискретизации – 100 Гц, для анализа выбран частотный диапазон от 0 до 20 Гц. Рассчитана спектральная плотность мощности скорости и построена кривая спектральных отношений – метод HVSR, также известный в литературе, как метод Накамуры (рис. 3).

На рис. 3 в левой части изображена трехканальная сейсмограмма (три ортогональных канала для регистрации микросейсмических колебаний) во временной области. В правой части – спектральные характеристики (изображение записанного сигнала в частотной области). Помимо спектральной плотности мощности скорости смещения для каждого канала, рассчитано значение спектральных отношений (H/V).

На передаточной характеристике (см. рис. 3, нижний график, справа) наблюдается максимум на частоте 8.4 Гц. Применяя формулу (1), получаем расчетную глубину залегания контрастной границы порядка 6 м.

$$h = V_s/4f, \quad (1)$$

где h – это мощность рыхлого слоя до контрастной границы в метрах, V_s – скорость поперечных волн в рыхлом слое до “скалы”, определенная по МПВ в м/с, f – резонансная частота максимального пика на кривой спектральных отношений (HVSR) в Гц.

В формулу (1) подставлена поперечная скорость, равная 200 м/с, как скорость в рыхлом слое по профилю (см. рис. 2). Данная формула применяется различными авторами в инженерных сейсмических исследованиях (Konno, Ohmachi, 1998; Тарасов и др., 2020).

Данный пример приведен для демонстрации корреляции результатов расчета глубины залегания контрастной границы между двумя различными сейсмическими методами. Совместный анализ МПВ и метода Накамуры показывает сопоставимый результат, на профиле в месте установки 1-го и 24-го каналов скальные грунты находятся на

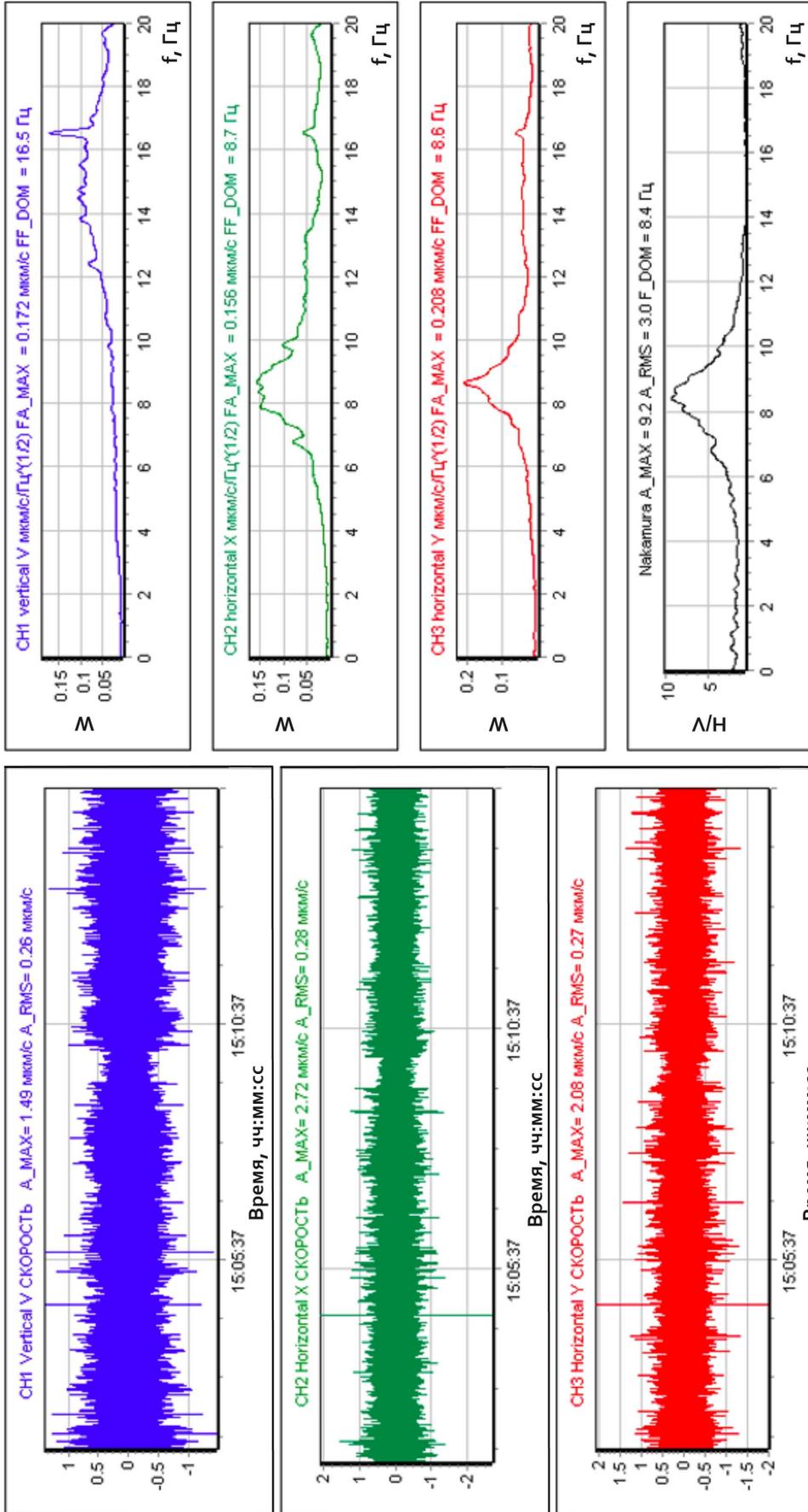


Рис. 3. Запись микросейсмических колебаний (слева – во временной области, справа – в частотной).

Fig. 3. Microtremor seismogram (left is the time domain, right is the frequency domain).



Рис. 4. Карта фактического материала, номера каналов МПВ и номера точек регистрации микросейсм.

Fig. 4. Fact material map, channel numbers, microtremor registration point numbers.

глубине порядка 6 м. Полученный результат хорошо соотносится с данными бурения. Следует помнить, что наземные косвенные геофизические методы носят оценочный характер.

Второй пример демонстрирует результативность совместного анализа метода регистрации микросейсм и МПВ. На полигоне в Юго-Западном лесопарке (г. Екатеринбург) находится зона контакта гранитов и габбро (Сенин и др., 2018). Задача исследования состоит в том, чтобы наземными методами определить, где начинается зона контакта. Вдоль просеки проведена регистрация микросейсмического фона с шагом 20, количество точек – 18, записи обработаны по методу Накамуры. В месте, где форма кривых спектральных отношений начинает качественно изменяться, выполнен профиль МПВ №1. На карте фактического материала приведены профиль МПВ №1 и точки наблюдения микросейсм № 9–14 (рис. 4)

На рис. 5 показаны кривые спектральных отношений в точках по профилю. На характеристиках прослеживаются несколько общих групп резонансных пиков.

Рассматривая изменение форм кривых спектральных отношений в точках наблюдений,

можно предположить, что между точками № 11 и 12 происходит качественное изменение грунтового массива, как вариант увеличение мощности рыхлых отложений или изменение плотности грунта. Для проверки данного предположения сделан профиль МПВ. Ниже приведен разрез со скоростным разрезом по поперечным волнам V_s (рис. 6).

В точке № 11 прослеживается резонанс на частоте около 11 Гц (кривая Н_11 на рис. 5). В этой же точке на профиле МПВ мощность рыхлых отложений составляет 5 м со скоростью $V_s = 200$ м/с (см. рис. 6 – 14-й канал, справа от середины косы). При подстановке значений в формулу (1) контрастная граница должна залегать ориентировочно на глубине 4.5 м.

Рассматривая скоростной разрез по профилю МПВ слева направо (см. рис. 6), наблюдаем изменение скорости поперечных волн от 350 до 530 м/с. Середина профиля соответствует точкам регистрации микросейсм № 12 и 13. Построение скоростного разреза подтверждает предположение об увеличении мощности рыхлых отложений в местах расположения точек регистрации микросейсм № 12–14.

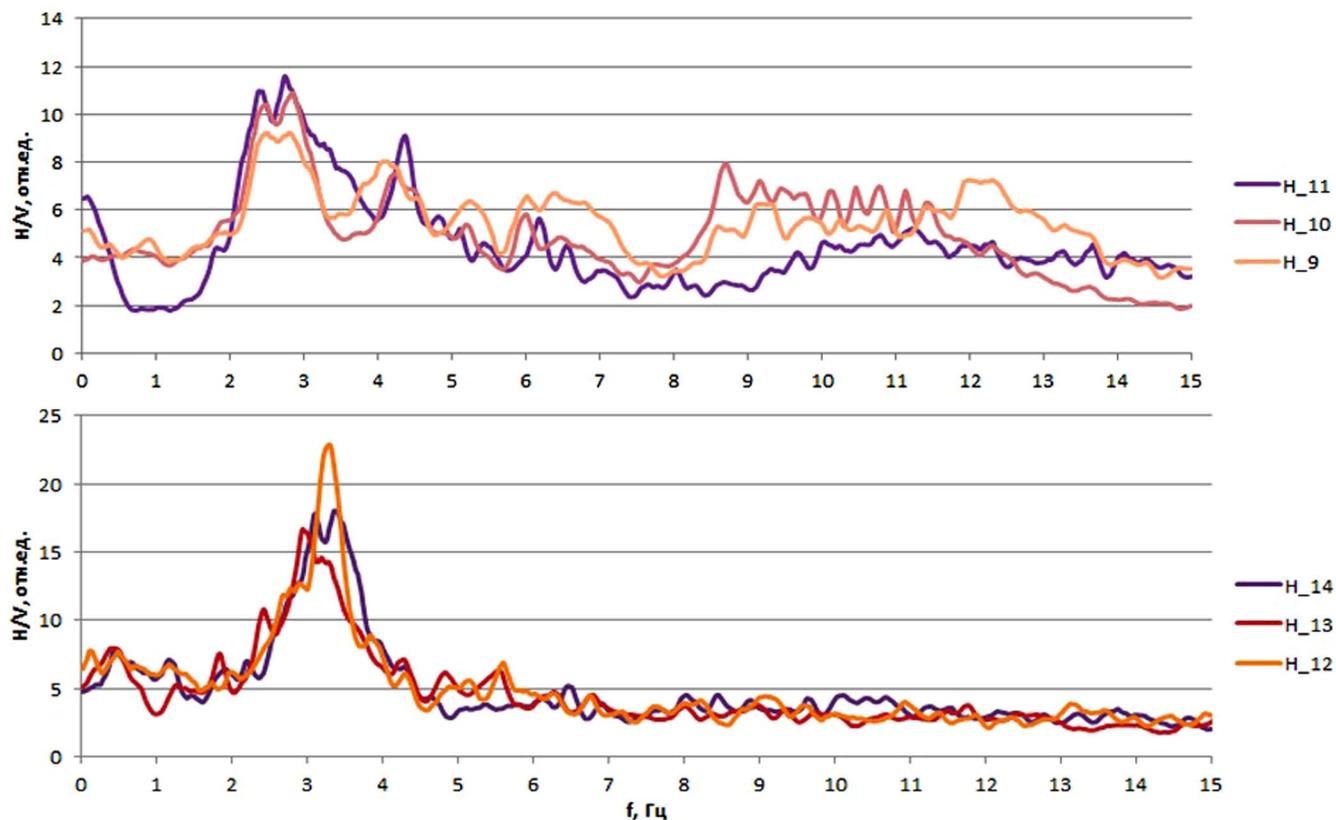


Рис. 5. Кривые спектральных отношений, точки регистрации микросейсм № 9–14.

Fig. 5. HVSR, points No 9–14.

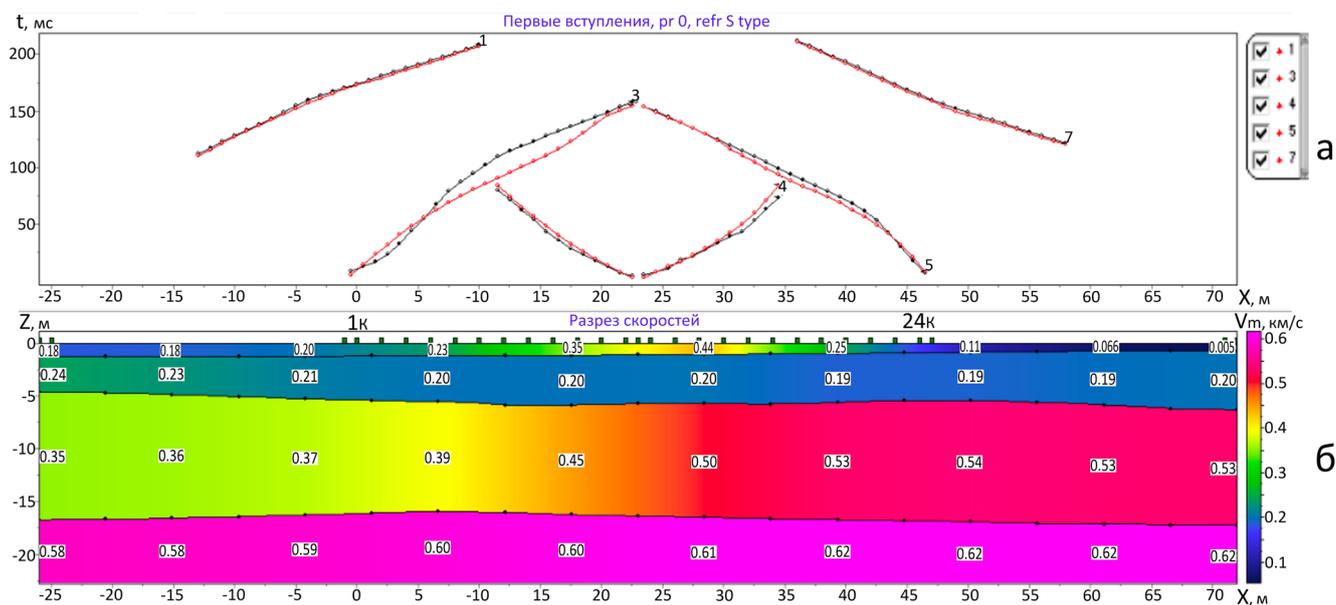


Рис. 6. Годографы (а) и скоростной разрез по поперечным волнам Vs (б).

Пояснения – см. рис. 2.

Fig. 6. Hodographs (a) and transverse wave velocity section Vs (б).

For explanations, see Fig. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность совместного использования двух сейсмических методов (активного и пассивного) при инженерно-геологических исследованиях. Результаты расчетов в первом примере демонстрируют наличие связи между резонансными характеристиками грунта, кривой спектральных отношений (H/V), скоростью поперечных волн и глубиной залегания скальных пород. Другими словами, формула (1) применима в данном случае для оценки уровня залегания контрастной по плотности пород границы. Прослеживается корреляция между данными ИГИ, скоростным разрезом МПВ и результатом обработки записей микросейсм. Таким образом, если инженерная задача состоит в определении глубины (или рельефа) залегания скальных пород, то для получения более достоверной информации рекомендуется совместное использование методов МПВ и метода регистрации микросейсм.

Второй пример показывает возможность применения метода регистрации микросейсм в качестве источника дополнительной информации при решении задач поиска структурных изменений в грунтовой толще, даже не имея данных ИГИ. Чтобы увеличить скорость работы по профилю или по площади и минимизировать количество профилей МПВ, можно провести регистрацию микросейсмического фона в выбранных точках наблюдения, выявить группы точек, описывающие однородные грунтовые условия (провести районирование), после выявления участков с различными грунтовыми условиями (по разнице формы кривых спектральных отношений) на их границах провести профилирование МПВ. Являясь простым в реализации и обработке данных, метод регистрации микросейсм позволяет повысить скорость и качество изучения грунтовой толщи на предмет поиска структурных нарушений или изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биряльцев Е.В., Вихорева А.А., Захарчук В.А., Комаров А.Ю., Пыхалов В.В. (2021) Метод обработки данных пассивной сейсмике для выявления контрастных внутрисоловых пропластков в геологическом разрезе Астраханского свода. *Георесурсы*, **23**(3), 109-117. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.14>
- Бобров В.Ю., Герасимова И.Ю. (2021) Применение метода преломленных волн при условии сложной конфигурации преломляющей границы. *Инженерная и рудная геофизика – 2021*. Геленджик, Россия, 61-69. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152061>
- Воскресенский М.Н. (2022) Инженерные сейсмические изыскания в различных грунтовых условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, **5**(1), 56-69. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_56
- Герасимова И.Ю. (2020) Изучение упругой анизотропии верхней части разреза по данным малоглубинной сейсморазведки. *Горное эхо*, **1**(78), 59-62. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.1.13>
- Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Камшилин А.Н. (2008) Специфика применения метода микросейсмического зондирования в инженерных задачах. *Вопр. инженерн. сейсмологии*, **35**(2), 25-30.
- Горбатиков А.В., Цуканов А.А. (2019) Об оценке результатов метода микросейсмического зондирования при их геологической интерпретации. *Геология и геофизика Юга России*, **9**(3), 139-150. <https://doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36482>
- Давыдов В.А. (2019) Малоглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм. *Георесурсы*, **21**(1), 78-85. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>
- Давыдов В.А. (2021) Поиски подземных ходов с помощью сейсморазведки на примере заброшенного монастыря. *Урал. геофиз. вестник*, **2**(44), 21-27. <https://doi.org/10.25698/UGV.2021.2.3.21>
- Плотников Б.С., Черкашнев С.А. (2021) Реальность и перспективы технологии микросейсмического мониторинга. *Приборы и системы разведочной геофизики*, **3**(70), 29-32.
- Романов В.В. (2013) Возможности повышения разрешенности сейсмограмм метода преломленных волн (МПВ). *Технологии сейсморазведки*, **4**, 67-73.
- Романов В.В., Гапонов Д.А. (2014) Применение инженерной сейсморазведки при изучении грунтовых вод в глинистых грунтах. *Северо-кавказский регион. Сер.: Естеств. науки*, **6**(184), 52-59.
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. (2005) Сейсмическая станция “Синус”. *Приборы и техника эксперимента*, **5**, 162-163.
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И. (2018) Комплексные сейсмические исследования верхней части геологического разреза. *Урал. геофиз. вестн.*, **4**(34), 41-49. <https://doi.org/10.25698/UGV.2018.4.7.41>
- Тарасов С.А., Гоев А.Г., Волосов С.Г., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н., Королев С.А. (2020) Уточнение скоростного разреза осадочной толщи методом Накамуры на новых сейсмических станциях ИДГ РАН. *Росс. сейсмол. журн.*, **2**(4), 43-50. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.04>
- Турчков А.М., Ошкин А.Н., Вязниковцев А.А. (2021) Опыт применения сейсморазведочных методов отраженных и преломленных волн для изучения строения тела плотины. *Инженерная и рудная геофизика – 2021*. Геленджик, Россия, 75-82. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152075>
- Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. (2020) Картирование Барсуковской пещеры пассивным сейсмическим методом стоячих волн. *Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология*. XVI Междунар. конф., 665-673. <https://doi.org/10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-073>
- Яблоков А.В., Дергач П.А., Лисейкин А.В. (2023) Обработка записей микросейсмических колебаний методом Накамуры на территории Быстровского вибросейсмического полигона. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*, **2**(4). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2023-2-4-86-93>
- Яскевич С.В., Дергач П.А., Чернышов Г.С., Карпунин В.И., Дучков А.А. (2021) Изучение анизотропии

- ВЧР на полигоне Ключи методом преломленных волн. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*, **2**, 90-97. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-90-97>
- Hellel M., Oubaiche E.H., Chatelain J.L., Bensalem R., Amarni N., Boukhrouf M., Wathelet M. (2019) Efficiency of ambient vibration HVSR investigations in soil engineering studies: backfill study in the Algiers (Algeria) harbor container terminal. *Bull. Engin. Geol. Environ.*, **78**(7), 4989-5000. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-01458-y>
- Hunter J.A., Crow H.L., Stephenson W.J., Pugin A.J.M., Williams R.A., Harris J.B., Odum J.K., Woolery E.W. (2022) Seismic site characterization with shear wave (SH) reflection and refraction methods. *J. Seismol.*, **26**, 631-652. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10042-z>
- Konno K., Ohmachi T. (1998) Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **88**(1), 228-241.
- Nakamura Y. (2019) What Is the Nakamura Method? *Seismol. Res. Lett.*, **90**(4), 1437-1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
- Vargemezis G., Tsourlos P., Fikos I., Diamanti N., Angelis D., Amanatidou E. (2019) Void Detection and Consolidation Filling Verification by ERT, GPR and Seismic Refraction Methods. *1st Conference on Geophysics for Infrastructure Planning Monitoring and BIM*. The Hague, Netherlands. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902525>
- REFERENCES
- Biryal'tsev E.V., Vikhoreva A.A., Zakharchuk V.A., Komarov A.Ju., Pykhalov V.V. (2021) Passive Seismic Data Processing Method for Identification of Contrasting Intracrustal Interlayers in the Geological Section of the Astrakhan Arch. *Georesursy*, **23**(3), 109-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.14>
- Bobrov V.Yu., Gerasimova I.Ju. (2021) Application of refracted wave method under condition of complex configuration of refractive boundary. *Inzhenernaya i Rudnaya Geofizika – 2021*. Gelendzhik, Russia. 61-69. (In Russ.) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152061>
- Davydov V.A. (2019) Shallow Seismic Exploration Based on Microseism Ellipticity. *Georesursy*, **21**(1), 78-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>
- Davydov V.A. (2021) Search for underground passages using seismic exploration using the example of an abandoned monastery. *Ural'skii Geofizicheskii Vestnik*, **2**(44), 21-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.25698/UGV.2021.2.3.21>
- Fedin K.V., Kolesnikov Y.I., Ngomaiezve L. (2020) Mapping the Barsukovskaya cave by passive seismic method of standing waves. *Subsurface use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology*. XVI Int. Conf., 665-673. (In Russ.) <https://doi.org/10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-073>
- Gerasimova I.Yu. (2020) Study of elastic anisotropy of the upper part of the section based on shallow seismic data. *Gornoe ekho*, **1**(78), 59-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2020.1.13>
- Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Kamshilin A.N. (2008) Specifics of Application of Microseismic Sounding Method in Engineering Tasks. *Voprosy Inzhenernoi Seismologii*, **35**(2), 25-30. (In Russ.)
- Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A. (2019) Evaluation of the results of the microseismic sounding method in their geological interpretation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*, **9**(3), 139-150. (In Russ.) <https://doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36482>
- Hellel M., Oubaiche E.H., Chatelain J.L., Bensalem R., Amarni N., Boukhrouf M., Wathelet M. (2019) Efficiency of ambient vibration HVSR investigations in soil engineering studies: backfill study in the Algiers (Algeria) harbor container terminal. *Bull. Engin. Geol. Environ.*, **78**(7), 4989-5000. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-01458-y>
- Hunter J.A., Crow H.L., Stephenson W.J., Pugin A.J.M., Williams R.A., Harris J.B., Odum J.K., Woolery E.W. (2022) Seismic site characterization with shear wave (SH) reflection and refraction methods. *J. Seismol.*, **26**, 631-652. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10042-z>
- Konno K., Ohmachi T. (1998) Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **88**(1), 228-241.
- Nakamura Y. (2019) What Is the Nakamura Method? *Seismol. Res. Lett.*, **90**(4), 1437-1443.
- Plotnikov B.S., Cherkashnev S.A. (2021) Reality and Prospects of Microseismic Monitoring Technology. *Pribery i Sistemy Razvedochnoi Geofiziki*, **3**(70), 29-32. (In Russ.)
- Romanov V.V. (2013) Possibilities to increase resolution of refraction method seismograms. *Tekhnologii Seismorazvedki*, **4**, 67-73. (In Russ.)
- Romanov V.V., Gaponov D.A. (2014) Application of engineering seismic exploration in the study of groundwater in clay soils. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Severo-Kavkazskii Region. Ser.: Estestvennye Nauki*, **6**(184), 52-59. (In Russ.)
- Senin L.N., Senina T.E., Voskresenskii M.N., Parygin G.I. (2018) Comprehensive seismic surveys of the upper part of the geological section. *Ural'skii Geofizicheskii Vestnik*, **4**(34), 41-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.25698/UGV.2018.4.7.41>
- Senin L.N., Senina T.E. (2005) Seismic station "Sinus". *Pribery i Tekhnika Eksperimenta*, **5**, 162-163. (In Russ.)
- Tarasov S.A., Goev A.G., Volosov S.G., Gorbunova Je.M., Ivanchenko G.N., Korolev S.A. (2020) Refinement of the velocity section of the sedimentary strata using the Nakamura method at the new seismic stations of the IDG RAS. *Rossiiskii Seismologicheskii Zhurnal*, **4**, 43-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.04>
- Turchkov A.M., Oshkin A.N., Vyaznikovtsev A.A. (2021) Experience of using seismic methods of reflected and refracted waves to study the structure of the dam body. *Inzhenernaya i Rudnaya Geofizika – 2021*. Gelendzhik, Russia. 75-82. (In Russ.) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152075>
- Vargemezis G., Tsourlos P., Fikos I., Diamanti N., Angelis D., Amanatidou E. (2019) Void Detection and Consolidation Filling Verification by ERT, GPR and Seismic Refraction Methods. *1st Conference on Geophysics for Infrastructure Planning Monitoring and BIM*, The Hague, Netherlands. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902525>
- Voskresenskii M.N. (2022) Engineering seismic surveys in various soil conditions. *Gornyi Informatsionno-analiticheskii Byulleten'*, **5**(1), 56-69. (In Russ.) <https://doi.org>

/10.25018/0236_1493_2022_51_0_56

Yablokov A.V., Dergach P.A., Liselkin A.V. (2023) Processing of microseismic oscillation records by Nakamura method on the territory of Bystrovsky vibroseismic polygon. *Interekspo GEO-Sibir'*, 2(4), 86-93. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2023-2-4-86-93>

Yaskevich S.V., Dergach P.A., Chernyshov G.S., Karpukhin V.I., Duchkov A.A. (2021) Study of anisotropy of the upper part of the geological section at the Klyuchi polygon using the refraction wave method. *Interekspo GEO-Sibir'*, 2, 90-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-90-97>