



ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРАСТНЫХ ГРАНИЦ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПУТЕМ АНАЛИЗА ОСОБЕННОСТЕЙ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ СКОРОСТЕЙ ВОЛНЫ РЕЛЕЯ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Р.А. Ефремов^{1,2,3}, А.С. Сердюков^{1,2,3}, А.В. Яблоков^{1,2,3}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,*

³*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54, Россия,
e-mail: r.efremov2@g.nsu.ru*

Важным приложением метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW) является оценка сейсмической безопасности. Ключевыми параметрами при расчете приращений балльности в ходе сейсмического микрорайонирования является толщина и средняя скорость массива грунтов, лежащих на основании из более жестких скальных горных пород. Специально для определения этих параметров нами предлагается новый метод построения горизонтально-слоистых моделей верхней части геологического разреза с использованием особенностей (положений экстремумов второй производной) дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностной волны Релея, которые, как показали численные эксперименты, связаны с положением контрастных границ в исследуемой среде (т. е., например, граница между грунтами и скальными породами). Такой подход значительно проще традиционно решаемой в методе MASW задачи восстановления горизонтально-слоистой модели по набору значений фазовых скоростей для последовательности частот и не требует задания начального приближения и/или каких-то ограничений на возможные значения параметров модели. В случае двухслойных и трехслойных сред наш подход сводится к простому и быстрому применению явных формул.

Сейсмическое микрорайонирование, MASW, дисперсионная кривая, волна Релея

DETERMINATION OF THE CONTRAST BOUNDARIES OF THE LOW VELOCITY ZONE BY ANALYZING THE FEATURES OF THE DISPERSION CURVES OF THE RAYLEIGH WAVE VELOCITIES BASED ON EMPIRICAL DEPENDENCIES

R.A. Efremov^{1,2,3}, A.S. Serdyukov^{1,2,3}, A.V. Yablokov^{1,2,3}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Chinakal Institute of Mining SB RAS, Krasny Ave., 54, Novosibirsk, 630091, Russia
e-mail: r.efremov2@g.nsu.ru*

An important application of the multichannel surface wave (MASW) method is seismic safety assessment. The key parameters in the calculation of increments in the input of seismic microzoning are the thickness and average velocity of the soil mass lying on the base of more rigid rocks. To determine these parameters, we propose a new method for constructing horizontally layered models of the upper part of the geological section using the features (positions of extrema of the second derivative) of the dispersion curves of phase velocities of the Rayleigh surface wave, which, as shown by numerical experiments, are associated with the position of contrasting boundaries in the medium under study. (e.g., the boundary between soils and rocks). This approach is much simpler than the problem of recovering a horizontally layered model

traditionally solved in the MASW method from a set of phase velocities for a sequence of frequencies and does not require an initial approximation and/or any restrictions on the possible values of the model parameters. In the case of two-layer and three-layer media, our approach is reduced to a simple and fast application of explicit formulas.

MASW, dispersion curve, Rayleigh wave, seismic hazard assessment

ВВЕДЕНИЕ

Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW) [Park et al., 1999] является популярным методом малоглубинной сейсморазведки. Одно из важных приложений метода – оценка сейсмической безопасности на основе получаемых с помощью MASW оценок скоростей поперечных сейсмических волн. Российские нормативные документы рекомендуют применять MASW в целях сейсмического микрорайонирования при строительстве объектов повышенной ответственности [Свод правил ..., 2016], а скорости поперечных волн, найденные с помощью MASW, могут использоваться для расчета акселерограмм, необходимых при проектировании строительных объектов. В западных странах MASW широко используется, например, при строительстве ветряных электростанций [Park, 2013] – для оценки воздействия вибраций турбины на грунт. При этом для оценок сейсмостойкости принято рассматривать усредненную скорость поперечных волн на глубину 30 м. Эту величину обозначают $V_{s,30}$ [Park, 2013]. Меньшие значения $V_{s,30}$ приводят к большим приращениям сейсмических интенсивностей. В отечественных правилах [Свод правил ..., 2016] так же присутствуют рекомендации о рассмотрении средних скоростей поперечных волн на эту глубину, а приращение балльности, на основе усредненных скоростей, находятся с помощью метода сейсмических жесткостей [Алёшин, 2016].

Помимо значений скорости поперечных сейсмических волн метод MASW также позволяет достоверно находить и границы между слоями горных пород с резко меняющимися свойствами. Важной задачей является нахождение границы между грунтами и скальными породами – подошвы зоны малых скоростей (ЗМС). Толщина ЗМС наряду со средними значениями V_s является ключевым параметром, влияющим на интенсивность сейсмического воздействия. Резкий контраст свойств при переходе от относительно мягких грунтов к жестким консолидированным коренным горным породам приводит к резонансным явлениям – появлению стоячих волн на определенной (достаточно низкой) частоте. Для исследования этих явлений широкое распространение в западных странах и Японии получил метод Накамуры [Nakamura, 1989], который основан на поиске экстремумов отношения спектральных амплитуд записей вертикальных и горизонтальных смещений – HVSR (horizontal-to-vertical spectral ratio). По утверждениям самого автора [Nakamura, 2019], при использовании данных пассивных сейсмических наблюдений микросейсмических шумов, экстремумы HVSR связаны именно со стоячими волнами, а поверхностные волны, часто техногенной природы, являются при этом помехами. Тем не менее, в ряде работ [Abdialim et al., 2021] исследование толщины и границ ЗМС проводят методом HVSR именно на основе поверхностных волн [Dal Moro, 2011].

В случае поверхностных волн Релея HVSR отношение характеризует параметр эллиптичности – отношение длин осей эллипса, являющегося траекторией движения частиц среды. Как показано в работе [Boaga et al., 2013], при резком контрасте скоростей (более 2 раз), характерном для границы ЗМС, на определенной частоте наблюдается перегиб дисперсионной кривой фазовой скорости нулевой

фундаментальной моды волны Релея. При этом происходит смена траекторий движения частиц: от движения против часовой стрелки к движению по часовой стрелке. Как показывают наши эксперименты по обработке синтетических данных, в случае использования многоканальных систем наблюдения, этот перегиб фундаментальной моды возможно наблюдать и на f - k спектральных изображениях. В нашей статье мы анализируем зависимость частоты перегиба от положения границы и предлагаем простой метод построения модели скоростного разреза на основе этой частоты и наклонов (групповых скоростей) дисперсионной кривой до и после точки перегиба, на основе эмпирических зависимостей, полученных методом линейной регрессии. При этом мы рассматриваем не одну, а сразу две границы и, следовательно, две частоты перегиба.

Стандартным подходом построения слоистой модели скоростей поперечных волн в методе MASW является минимизация невязки между наблюдаемыми и расчетными фазовыми скоростями поверхностной волны на наборе частот. В более ранних работах рассматриваются алгоритмы локальной оптимизации типа градиентного спуска [Constable et al., 1987] или применяется линеаризация с последующей матричной инверсией, например, с применением метода LSQR [Mendiguren, 1977]. Поскольку рассматриваемая обратная задача является нелинейной, ближайший к начальному приближению локальный минимум функционала невязки может не соответствовать истинному решению. В большинстве современных работ рассматриваются методы глобальной оптимизации. Используются методы Монте-Карло [Socco, Boiero, 2008], алгоритмы роя частиц [Song et al., 2015], нейронные сети [Yablokov et al., 2021]. Заметим, что применение оптимизационных методов предполагает, как правило задание начального приближения и/или диапазонов параметров искомой слоистой модели скоростей сейсмических поперечных волн: возможное количество слоев, диапазоны глубин границ между ними и значений скоростей. Будем называть это заданием априорной модели. Так, например, в работах [Yablokov et al., 2021, 2023], в которых обработка дисперсионных кривых осуществляется с помощью многослойной полносвязной нейронной сети, для предварительного задания (до обучения нейронной сети) возможных диапазонов параметров слоистой модели и фиксированного количества слоев используется алгоритм из работы [Сох, Теагуэ, 2016]. В этом алгоритме ключевым параметром является коэффициент слоистости, определяющий количество слоев и диапазоны их возможных мощностей. Предлагаемый нами метод отличается от подобных алгоритмов задания априорной модели тем, что используются не просто наблюдаемые фазовые скорости, а особенности (точки перегиба) дисперсионной кривой, непосредственно связанные с наличием в среде резких границ. Метод был протестирован на синтетических моделях, а затем апробирован на полевых данных. Полученные результаты обработки полевых данных показывают, что полученный разрез достаточно хорошо совпадает с моделями, построенными с помощью применения методов глобальной оптимизации: Монте-Карло и GWO (Grey Wolf Optimizer) [Mirjalili et al., 2014].

МЕТОД

Рассмотрим типичную дисперсионную кривую, рассчитанную для горизонтально-слоистой модели среды, состоящей из трех слоев с параметрами: поперечные скорости для каждого слоя соответственно 123, 321 и 715 м/с, мощности слоев 2.94 и 18.7 м (третий слой – полупространство). Кривая приведена на рис. 1, б. Значительные контрасты скоростей между слоями приводят к образованию перегибов в окрестностях 5 и 15 Гц (рис. 1, а). Обозначим эти частоты как f_1 и f_2 , из рис. 1 понятно, что локальные минимумы соответствуют частотам перегиба. Как видно из рис. 1, а, выше f_1 и f_2 наблюдаются более

гладкие изгибы дисперсионной кривой в противоположную (основным перегибам) сторону, однако с дальнейшим увеличением частоты можно считать, что наклон кривой выходит на постоянные значения. Напомним, что тангенс угла дисперсионной кривой фазовой скорости (относительно горизонтальной оси к вертикальной оси, вдоль которой отложены волновые числа и частоты соответственно) равен значению групповой скорости.

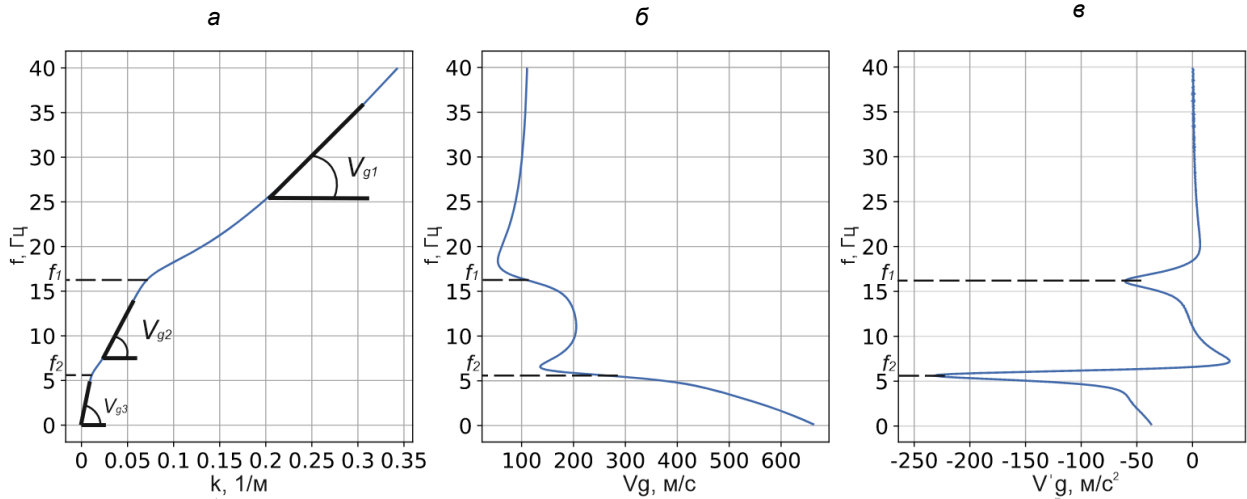


Рис. 1. Определение параметров дисперсионной кривой: а – дисперсионная кривая в координатах $f-k$, б – дисперсионная кривая групповых скоростей, в – производная групповых скоростей по частоте

Групповые скорости, соответствующие трем интервалам частот: $(0, f_1]$, (f_1, f_2) и $[f_2, \infty)$ обозначим: V_{g1} , V_{g2} и V_{g3} . В случае одного перегиба, определяются только две групповые скорости и одна частота. Еще раз подчеркнем, что данная кривая является типичной, т. е. в случае другой трехслойной или двухслойной подобной модели верхней части разреза (ВЧР) с резкими контрастами скоростей можно также выделить аналогичный набор параметров.

Для изучения взаимосвязи между параметрами дисперсионной кривой и моделью было создано 100 моделей двухслойной среды со следующими параметрами: скорость в первом слое варьировалась от 150 до 350 м/с, скорость в полубесконечности варьировалась от 350 до 1000 м/с, глубина границы выбиралась от 2 до 25 м. Также было создано 100 трехслойных моделей среды, скорость в первом, втором и полубесконечном слоях варьировалась от 100 до 250 м/с, от 100 до 400 м/с и от 400 до 1000 м/с соответственно. Глубина первого слоя выбиралась в диапазоне от 2 до 5 метров, а второго слоя от 8 до 25 метров. Модели генерировались таким образом, чтобы увеличение скорости от слоя к слою было не менее чем в $\sqrt{2}$ раз. Для каждой кривой определялись точки перегиба и групповые скорости.

Для изучения зависимостей между параметрами кривой и параметрами моделей были построены облака точек (рис. 2). В случае двуслойной среды зависимости могут быть хорошо аппроксимированы линейной моделью. Анализируя получившиеся тренды, из рис. 2, а–в, получаем:

$$V_{s1} = \frac{(V_{g1}-14)}{0.76}, V_{s2} = \frac{(V_{g2}-18)}{0.72}, f_{infl} = 0.2 * 1/t_k + 0.5, \quad (1)$$

где t_k – это кажущееся время падения $t_{ki} = \sum_{j=0}^i \frac{h_j}{V_{gj}}$, зависимость между глубиной границы и частотой перегиба выражается формулой

$$h = V_{g1} * \frac{0.2}{(f_{infl}-0.5)}. \quad (2)$$

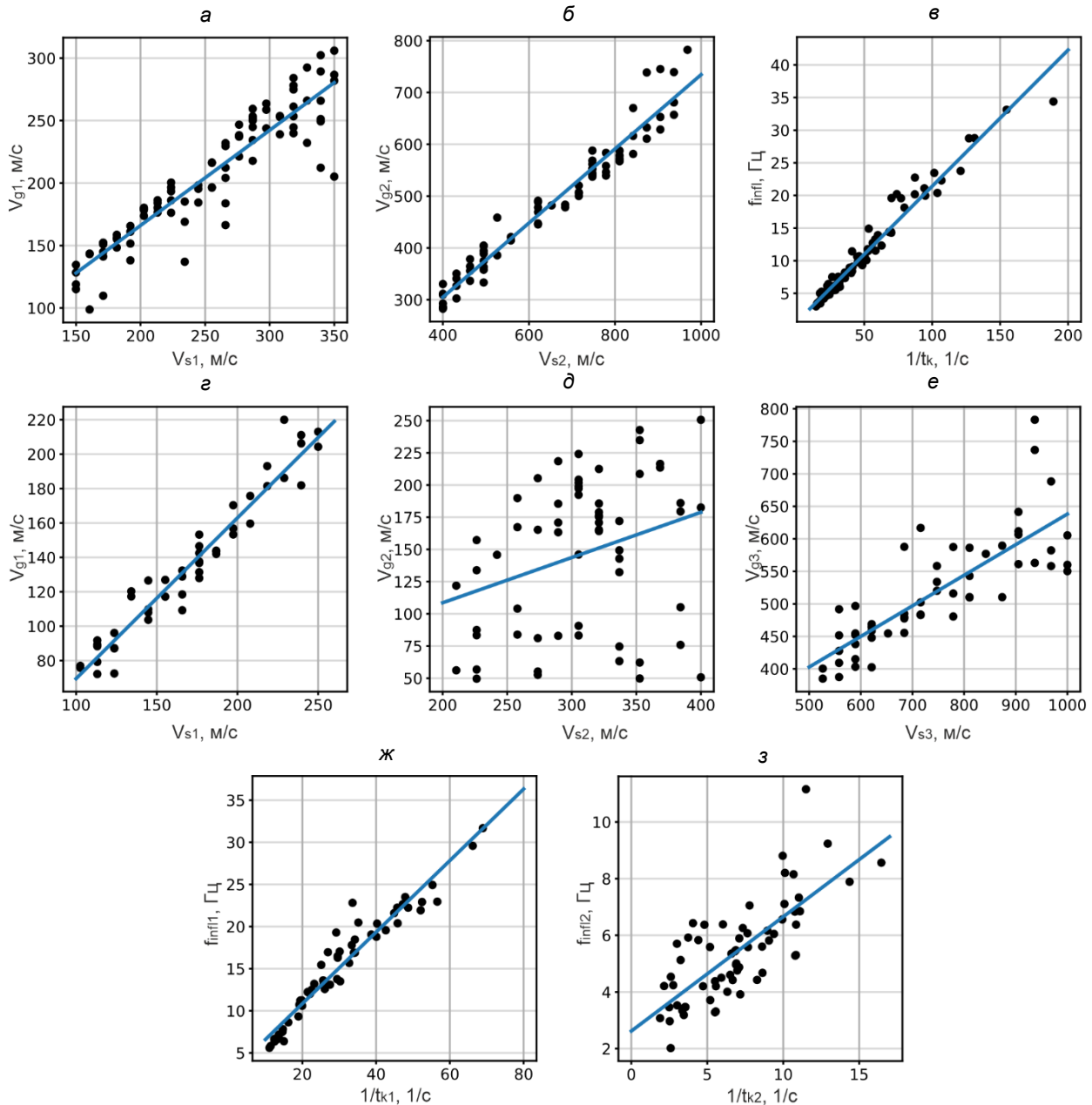


Рис. 2. Зависимости параметров кривой и параметров модели, и тренды (синяя линия): *а* – поперечной скорости верхнего слоя и первой групповой скорости в двуслойной среде, *б* – поперечной скорости полубесконечного слоя и второй групповой скорости в двуслойной среде, *в* – частоты, соответствующей перегибу и кажущимся временем падения в двуслойной среде, *г* – поперечной скорости верхнего слоя и первой групповой скорости в трехслойной среде, *д* – поперечной скорости второго слоя и второй групповой скорости в трехслойной среде, *е* – поперечной скорости полубесконечного слоя и третьей групповой скорости в трехслойной среде, *ж* – частоты, соответствующей верхнему перегибу и кажущимся временем падения до первой границы в трехслойной среде, *з* – частоты, соответствующей нижнему перегибу и кажущимся временем падения до второй границы в трехслойной среде

Для трехслойной среды зависимости показаны на рис. 2, *г*–*з*. Заметим, что зависимость второй групповой V_{g2} скорости от значения скорости поперечных волн в среднем слое трехслойной модели плохо описывается с помощью линейного закона (который мы тем не менее все равно далее рассмотрим), остальные параметры укладываются в линейные тренды. Таким образом, получаем серию соотношений для скоростей:

$$V_{s1} = \frac{V_{g1} + 4.22}{0.83}, V_{s2} = \frac{V_{g2} + 25.8}{0.39}, V_{s3} = \frac{V_{g3} - 158}{0.48}, \quad (3)$$

и глубин слоев в зависимости от частот перегиба:

$$f_{infl1} = 0.42 * 1/t_{k1} + 2.4, h_1 = V_{g1} * \frac{0.42}{f_{infl1} - 2.4}, f_{infl2} = 0.4 * 1/t_{k2} + 2.62, h_2 = \left(\frac{0.4}{f_{infl2} - 2.62} - \frac{0.42}{f_{infl1} - 2.4} \right) * V_{g2}. \quad (4)$$

ОБРАБОТКА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Для проверки полученных зависимостей были проведены численные эксперименты по обработке синтетических сейсмограмм, рассчитываемых методом конечно-разностного решения системы уравнений с использованием программного пакета SOFI2D. Рассматривалось несколько моделей двухслойных и трехслойных сред, параметры которых приведены в табл. 1 (двухслойные среды) и табл. 2 (трехслойные среды). Использовался линейный профиль наблюдения протяженностью 50 м с шагом 5 м, пункт возбуждения располагался на удалении 15 м. Процесс распространения волн инициировался с помощью импульса Рикера с центральной частотой 20 Гц, тип источника – вертикальная сила. Для каждой полученной сейсмограммы строились f – k спектральные изображения, определялись максимумы амплитуд, соответствующие фундаментальной моде волны Релея. Затем определялись частоты перегиба и групповые скорости, необходимые для применения формул (1)–(4). Спектральные изображения, определенные по ним групповые скорости и частоты перегиба, а также восстановленные и истинные параметры двухслойной модели № 2 и трехслойной модели № 1 (см. табл. 1 и 2) приведены на рис. 3. На рисунке 3, а, в показаны спектральные f – k изображения синтетических сейсмограмм, хорошо прослеживается фундаментальная мода поверхностной волны Релея. Путем анализа полученных изображений вручную были определены частоты перегиба и групповые скорости. Значения скоростей и глубин границ, полученные на основе зависимостей (1)–(4), приведены в правой части рис. 3. Там же для сравнения приведены истинные значения параметров моделей. Анализируя результаты экспериментов, приведенных в табл. 1, 2 и на рис. 3, можно отметить относительно точное восстановление глубин границ, как в случае двухслойных, так и в случае трехслойных сред. Значения скоростей поперечных волн в случае двухслойных сред также получаются достаточно достоверными. В трехслойных средах в среднем слое значения скорости могут получаться недостоверными. Результаты, получаемые предлагаемым методом, зависят от выбора частот перегиба и значений групповых скоростей. Как видно из спектральных f – k изображений, приведенных на рис. 3, а, в, определение частоты перегиба – неоднозначная процедура. Как уже упоминалось во введении, при резких контрастах скоростей наблюдается перераспределение энергии между модами, что приводит к появлению особенностей в спектральных изображениях в районе частот перегиба (см. рис. 3, а, в). Характерным явлением являются осцилляции линии спектральных пиков фундаментальной моды, а затем ее исчезновение ниже частоты перегиба, соответствующей границе между нижним слоем и полупространством (см. рис. 3). Как можно заметить из рис. 3, в, в случае трехслойной среды в окрестности второй частоты перегиба, соответствующей глубине верхнего слоя, наблюдается размывание спектрального изображения фундаментальной моды (утолщение цветового пятна на рис. 3, в чуть выше 15 Гц.). Как показывают численные эксперименты, подобные артефакты возникают и в горизонтально-слоистых моделях сред при наличии резких контрастов скоростей поперечных волн, и могут использоваться при выборе частот перегиба. Конкретного алгоритма выбора частот перегиба в данной работе мы не предлагаем – во всех расчетах выбор осуществлялся вручную.

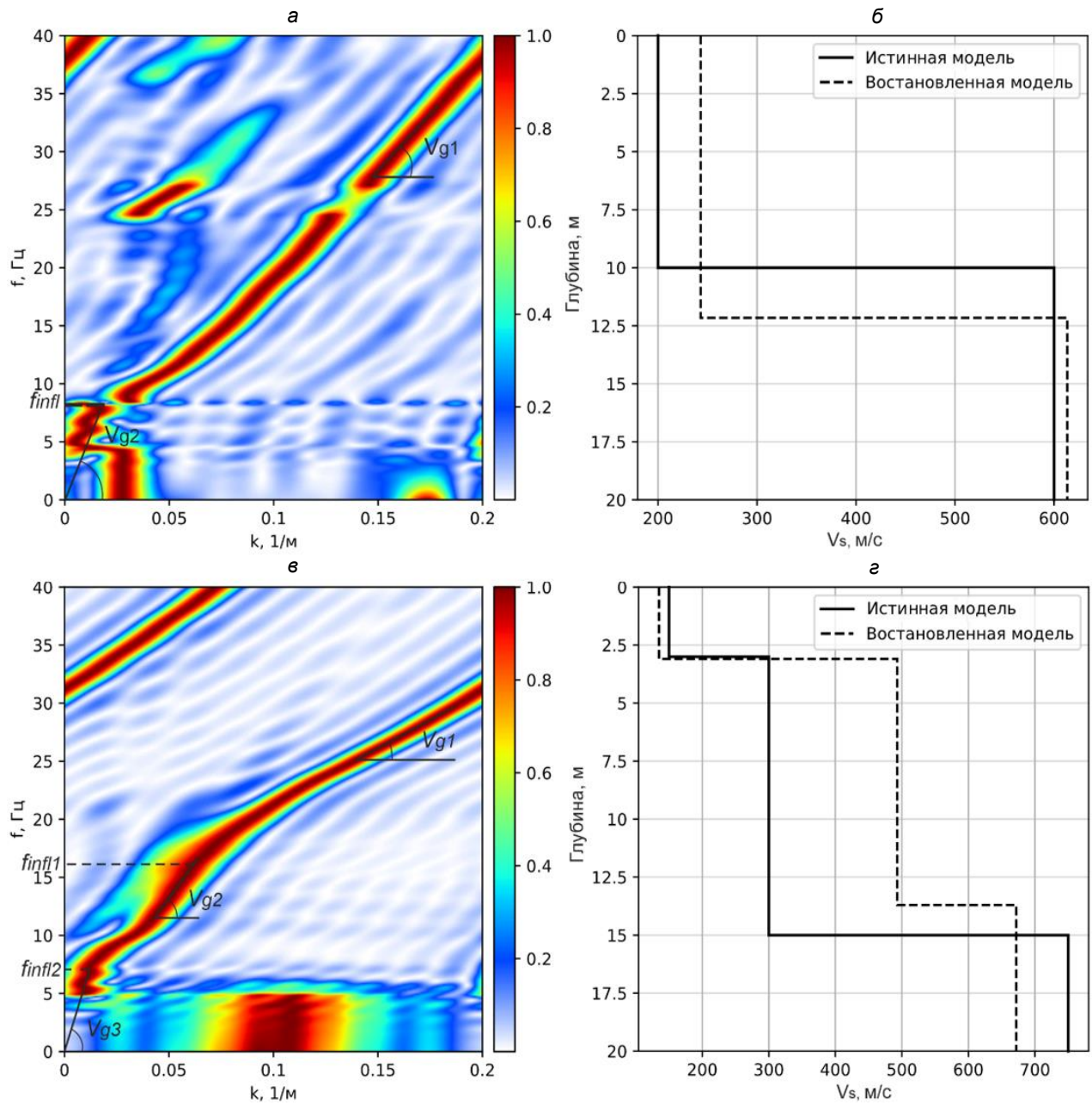


Рис. 3. Пример использования эмпирических зависимостей на синтетических данных: а – спектральное $f-k$ изображение синтетической двуслойной модели, б – сравнение истинной и обращенной моделей для двуслойной среды, в – спектральное $f-k$ изображение синтетической трехслойной модели, г – сравнение истинной и обращенной моделей для трехслойной среды

Таблица 1

Параметры синтетических моделей и восстановленных моделей для двуслойной среды

Номер модели	V_{s1} , м/с	V_{s2} , м/с	h , м	V_{s1} восстановленная, м/с	V_{s2} восстановленная, м/с	h восстановленная, м
1	300	500	16	348	534	19
2	200	600	10	243	613	12.1
3	707	1000	20	816	1087	16
4	150	400	4.5	148	501	3.7

Таблица 2

Параметры синтетических моделей и восстановленных моделей для трехслойной среды

Номер модели	V_{s1} , м/с	V_{s2} , м/с	V_{s3} , м/с	h_1 , м	h_2 , м	V_{s1} восст., м/с	V_{s2} восст., м/с	V_{s3} восст., м/с	h_1 восст., м	h_2 восст., м
1	150	300	750	3	15	135	493	672	3.1	13.7
2	100	350	800	5	10	113	261	814	6.15	12.6
3	200	400	800	7	14	234	383	917	10.1	14.2
4	250	500	1000	5	17	260	535	1231	4.7	16.1

Целесообразным подходом является тестирование и перебор различных вариантов. При этом в качестве критерия выбора частот перегиба и групповых скоростей может служить невязка между наблюдаемой и расчетной, полученной для построенной модели, дисперсионными кривыми. Так как построение скоростной среды происходит по явным зависимостям (1)–(4) (т. е. предлагается прямой метод решения обратной задачи о восстановлении поперечных скоростей и глубин границ по дисперсионной кривой поверхностной волны Релея), оно происходит практически моментально, что позволяет произвести перебор большого количества параметров.

ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ

Полевые работы по получению и обработке данных поверхностных сейсмических волн проводились на территории г. Новосибирска осенью 2022 года. Так как частота перегиба при глубине границы более 10 м принимает значения ниже 10 Гц, вместо привычных геофонов было принято решение использовать более низкочастотные и чувствительные сейсмологические датчики. Использовались два датчика СК-1П, для которых была проведена калибровка на коэффициент затухания 0.6, собственная частота датчиков 1 Гц. Возбуждение колебаний производилось путем ударов кувалдой по металлической пластине.

Так как в наличии имелось только два датчика нами была разработана и применена следующая методика моделирования многоканальных сейсмических записей (которые необходимы для применения метода MASW) из набора двухканальных записей. Использовались два пункта наблюдения. Первый пункт наблюдения находился на расстоянии 15 м от пункта возбуждения, а дальний пункт наблюдения перемещался вдоль профиля (линии, на которой располагается источник и все приемники) с шагом 5 м удаления от первого приемника. Наибольшее расстояние между приемниками составило 50 м. Для каждой расстановки (источник и два пункта наблюдения) осуществлялось 10 ударов кувалдой с целью накопления полезного сигнала.

Ближний приемник остается неподвижным для всех расстановок, его записи использовались для синхронизации пар записей ближних приемников. Между сигналами ближнего приемника вычисляется кросс-корреляция, максимум которой соответствует количеству отсчетов, на которое необходимо сдвинуть запись дальнего (второго) приемника. На рисунке 4, а показаны записи ближнего приемника для расстановки 5 и 15 м и временной сдвиг (dt), соответствующий максимуму кросс-корреляции. Итоговая сейсмограмма составляется из смещенных записей второго приемника, одна из которых показана на рис. 4, б. В качестве первой трассы в итоговой сейсмограмме используется усредненная запись ближнего приемника.

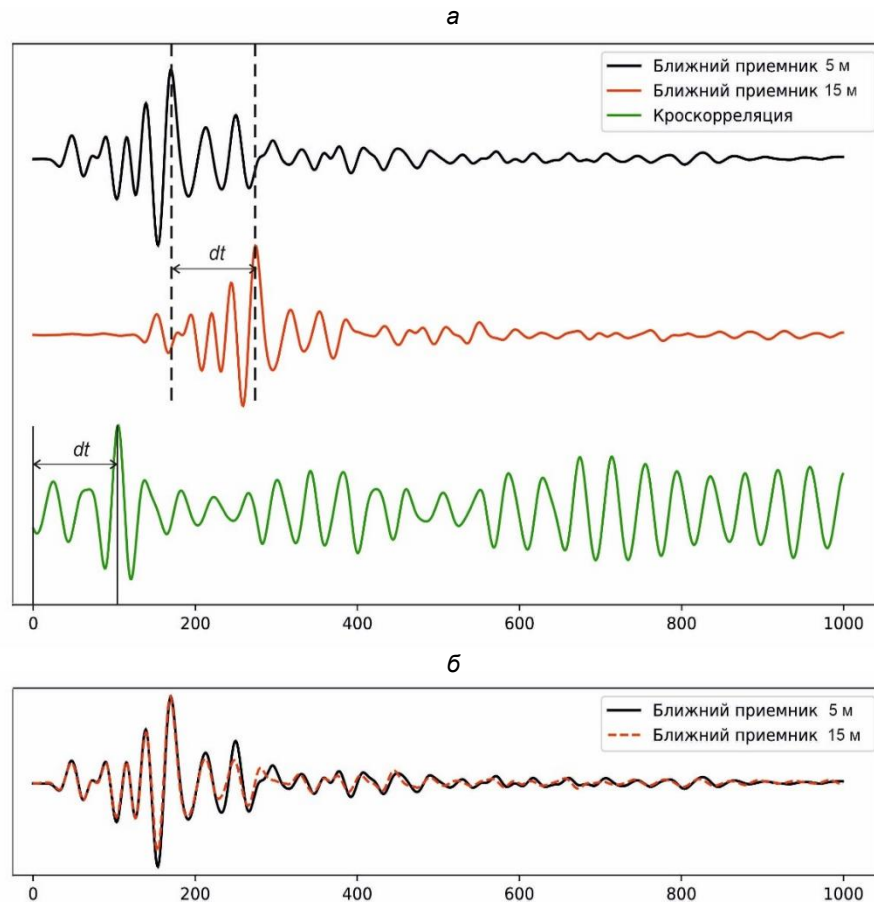


Рис. 4. Схема синхронизации записи: *а* – сигналы ближних приемников до смещения, кросс-корреляция этих сигналов, *б* – сигналы ближних приемников после смещения

Смоделированная таким образом сейсмограмма многоканальных записей показана на рис. 5, *а*. На рисунке 5, *б* показан ее f – k амплитудный спектр, на котором пропикирована дисперсионная кривая. Для дисперсионной кривой получены частоты перегиба и соответствующие групповые скорости: $f_1 = 12.5$ Гц, $f_2 = 5.6$ Гц, $V_{g1} = 97.5$ м/с, $V_{g2} = 209$ м/с, $V_{g3} = 467$ м/с. По этим параметрам с помощью зависимостей (1)–(4) была получена модель трехслойной среды, показанная на рис. 5, *в* черной линией (эмпирическая модель). Также дисперсионная кривая была обращена с помощью методов Монте-Карло (MC) [Socco, Voiero, 2008] и Gray Wolf Optimizer (GWO) [Song et al., 2015], результаты показаны на рис. 5, *в* зеленым и красным соответственно. Параметры всех трех полученных моделей (предлагаемый подход – эмпирическая модель, MC и GWO) приведены в табл. 3. Все три метода дают близкие результаты. При этом предлагаемый нами эмпирический метод требует применения лишь простых формул (1)–(4) в отличие от MC и GWO, которые основаны на многократном расчете дисперсионных кривых. Также наш метод, в отличие от MC и GWO, не требует задания начального приближения и/или фиксированных диапазонов возможных значений параметров модели.

Таблица 3

Модели, полученные разными методами обращения

Метод	V_{s1} , м/с	V_{s2} , м/с	V_{s3} , м/с	h_1 , м	h_2 , м
Эмп. зависимости	122	257	643	4.1	19.3
Монте-Карло	141	286	672	3.1	17.9
GWO	148	310	568	3.7	18.5

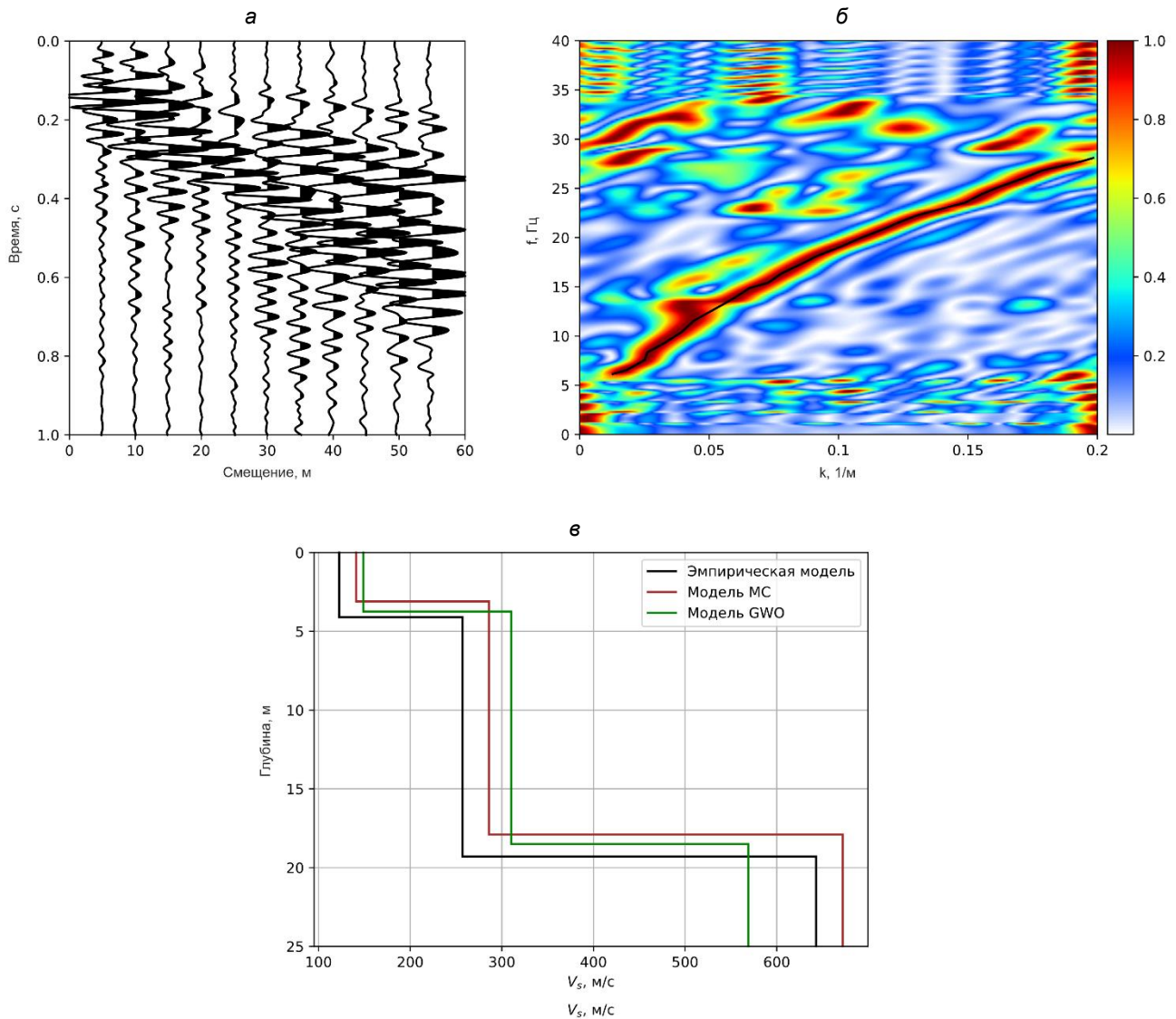


Рис. 5. Полевые данные: а – сейсмограмма z-компоненты, б – спектральное изображение, пропикированная дисперсионная кривая, в – полученные модели разными методами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод, позволяющий восстанавливать параметры верхней части разреза на основе особенностей дисперсионной кривой фазовых скоростей волны Релея: точек перегиба (экстремумы второй производной). Путем анализа наборов синтетических данных для двухслойных и трехслойных сред нами получены явные соотношения, позволяющие определять глубины границ и значения поперечных скоростей. Отличием от существующих методов определения строения верхней части геологического разреза по фазовым скоростям поверхностных волн является использование особенностей дисперсионных кривых: точек перегиба и линейных трендов гладких участков, а не большого набора значений фазовых скоростей на различных частотах. Как показано в статье на синтетических данных, положение (частота) точки перегиба дисперсионной кривой имеет связь с глубиной резких контрастных границ. Подобной границей является кровля коренных пород, перекрытых несвязными грунтами, определение глубины которой является важной задачей при оценке приращения сейсмической балльности в ходе проведения сейсмического микрорайонирования.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешин А.С.** Апология метода сейсмических жесткостей // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – № 3. – С. 13–21.
- Свод правил 283.1325800.2016** «Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования». – Москва: Минстрой России, 2016. – 24 с.
- Abdialim S., Hakimov F., Kim J., Ku T., Moon S.W.** Seismic site classification from HVSR data using the Rayleigh wave ellipticity inversion: A case study in Singapore // *Earthquakes and Structures*. – 2021. – Vol. 21 (3). – P. 231–238, doi: 10.12989/eas.2021.21.3.231.
- Boaga J., Cassiani G., Strobbia C.L., Vignoli G.** Mode misidentification in Rayleigh waves: Ellipticity as a cause and a cure // *Geophysics*. – 2013. – Vol. 78 (4). – P. EN17–EN28, doi: 10.1190/geo2012-0194.1.
- Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G.** Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. – 1987. – Vol. 52 (3). – P. 289–300, doi: 10.1190/1.1442303.
- Cox B.R., Teague D.P.** Layering ratios: a systematic approach to the inversion of surface wave data in the absence of a priori information // *Geophysical Journal International*. – 2016. – Vol. 207 (1). – P. 422–438, doi: 10.1093/gji/ggw282.
- Dal Moro G.** Some aspects about surface wave and HVSR analyses: a short overview and a case study // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. – 2011. – Vol. 52 (2). – P. 241–259, doi: 10.4430/bgta0007.
- Mendiguren J.A.** Inversion of surface wave data in source mechanism studies // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82 (5). – P. 889–894, doi: 10.1029/JB082i005p00889.
- Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A.** Grey wolf optimizer // *Advances in Engineering Software*. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- Nakamura Y.** A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Railway Technical Research Institute. Quarterly Reports*. – 1989. – Vol. 30 (1). – P. 25–33.
- Nakamura Y.** What is the Nakamura method? // *Seismological Research Letters*. – 2019. – Vol. 90 (4). – P. 1437–1443, doi: 10.1785/0220180376.
- Park C.** MASW for geotechnical site investigation // *The Leading Edge*. – 2013. – Vol. 32 (6). – P. 656–662, doi: 10.1190/tle32060656.1.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J.** Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64 (3). – P. 800–808, doi: 10.1190/1.1444590.
- Socco L.V., Boiero D.** Improved Monte Carlo inversion of surface wave data // *Geophysical Prospecting*. – 2008. – Vol. 56 (3). – P. 357–371, doi: 10.1111/j.1365-2478.2007.00678.x.
- Song X., Tang L., Zhao S., Zhang X., Li L., Huang J., Cai W.** Grey wolf optimizer for parameter estimation in surface waves // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 75. – P. 147–157, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.04.004.
- Yablokov A.V., Serdyukov A.S., Loginov G.N., Baranov V.D.** An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – Vol. 69 (7). – P. 1405–1432, doi: 10.1111/1365-2478.13107.
- Yablokov A.V., Lugovtsova Y., Serdyukov A.S.** Uncertainty quantification of multimodal surface wave inversion using artificial neural networks // *Geophysics*. – 2023. – Vol. 88 (2). – P. KS1–KS11, doi: 10.1190/geo2022-0261.1.

REFERENCES

- Abdialim S., Hakimov F., Kim J., Ku T., Moon S.W.** Seismic site classification from HVSR data using the Rayleigh wave ellipticity inversion: A case study in Singapore // *Earthquakes and Structures*. – 2021. – Vol. 21 (3). – P. 231–238, doi: 10.12989/eas.2021.21.3.231.
- Aleshin A.S.** Apology of seismic rigidity method // *Earthquake Engineering. Construction Safety*. – 2016. – Vol. 3. – P. 13–21.
- Boaga J., Cassiani G., Strobbia C.L., Vignoli G.** Mode misidentification in Rayleigh waves: Ellipticity as a cause and a cure // *Geophysics*. – 2013. – Vol. 78 (4). – P. EN17–EN28, doi: 10.1190/geo2012-0194.1.
- Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G.** Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. – 1987. – Vol. 52 (3). – P. 289–300, doi: 10.1190/1.1442303.
- Cox B.R., Teague D.P.** Layering ratios: a systematic approach to the inversion of surface wave data in the absence of a priori information // *Geophysical Journal International*. – 2016. – Vol. 207 (1). – P. 422–438, doi: 10.1093/gji/ggw282.
- Dal Moro G.** Some aspects about surface wave and HVSR analyses: a short overview and a case study // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. – 2011. – Vol. 52 (2). – P. 241–259, doi: 10.4430/bgta0007.
- Mendiguren J.A.** Inversion of surface wave data in source mechanism studies // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82 (5). – P. 889–894, doi: 10.1029/JB082i005p00889.
- Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A.** Grey wolf optimizer // *Advances in Engineering Software*. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- Nakamura Y.** A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Railway Technical Research Institute. Quarterly Reports*. – 1989. – Vol. 30 (1). – P. 25–33.
- Nakamura Y.** What is the Nakamura method? // *Seismological Research Letters*. – 2019. – Vol. 90 (4). – P. 1437–1443, doi: 10.1785/0220180376.
- Park C.** MASW for geotechnical site investigation // *The Leading Edge*. – 2013. – Vol. 32 (6). – P. 656–662, doi: 10.1190/tle32060656.1.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J.** Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64 (3). – P. 800–808, doi: 10.1190/1.1444590.
- Socco L.V., Boiero D.** Improved Monte Carlo inversion of surface wave data // *Geophysical Prospecting*. – 2008. – Vol. 56 (3). – P. 357–371, doi: 10.1111/j.1365-2478.2007.00678.x.
- Song X., Tang L., Zhao S., Zhang X., Li L., Huang J., Cai W.** Grey wolf optimizer for parameter estimation in surface waves // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 75. – P. 147–157, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.04.004.
- SP 283.1325800.2016** "Construction objects of increased responsibility. Rules of seismic microdistricting". – Ministry of Construction of Russia, Moscow, 2016. – 24 p.
- Yablokov A.V., Serdyukov A.S., Loginov G.N., Baranov V.D.** An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – Vol. 69 (7). – P. 1405–1432, doi: 10.1111/1365-2478.13107.
- Yablokov A.V., Lugovtsova Y., Serdyukov A.S.** Uncertainty quantification of multimodal surface wave inversion using artificial neural networks // *Geophysics*. – 2023. – Vol. 88 (2). – P. KS1–KS11, doi: 10.1190/geo2022-0261.1.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЕФРЕМОВ Роман Александрович – магистрант Новосибирского государственного университета, инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, техник Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Основные научные интересы: геофизика, прямая и обратная задачи, верхняя часть разреза, поверхностные сейсмические волны, метод HVSR, эллиптичность волны Релея.

СЕРДЮКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, старший преподаватель Новосибирского государственного университета, старший научный сотрудник Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Основные научные интересы: сейсмика, численное моделирование, теория упругости, уравнение эйконала, конечно-разностные схемы, сейсмическая томография, миграция, обратные задачи, поверхностные волны, каналовые волны, анизотропия, поглощение, среда Био.

ЯБЛОКОВ Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, старший научный сотрудник Новосибирского государственного университета, младший научный сотрудник Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Основные научные интересы: сейсморазведка, верхняя часть разреза, подавление поверхностных волн, спектральный анализ, прямая и обратная задача сейсмики, методы машинного обучения, численное моделирование.

*Статья поступила 21 марта 2023,
принята к печати 12 апреля 2023*