

Малоглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм

В.А. Давыдов

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: davyde@yandex.ru

Проведен краткий обзор предшествующего изучения спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент смещений микросейсмических колебаний. Рассмотрены основные принципы выделения резонансных границ и построения глубинных разрезов на базе H/V -отношений (эллиптичности). Представлено описание используемой аппаратуры, методики регистрации и обработки микросейсмического шума. Главной целью исследовательской работы является уточнение характера связи эллиптичности микросейсм с особенностями геологического строения и определение корректности построения глубинных разрезов на их основе. Исходными данными служат амплитудные спектры компонент микросейсмического сигнала, получаемые с помощью быстрого преобразования Фурье. В ходе экспериментальных работ выяснено, что спектральные отношения сохраняют свои характерные особенности вне зависимости от азимута наблюдений. На ряде практических примеров приводится сравнение микросейсмических разрезов с результатами других геофизических методов и информацией по бурению. Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере эллиптичности микросейсмического шума в разных условиях, однако позволяют определить основные границы раздела верхней части геологического разреза. Выделяемые с помощью микросейсм резонансные границы часто располагаются вблизи преломляющих сейсмических границ. Это согласуется с теорией о том, что резонансные эффекты возникают на границе раздела двух сред с большим контрастом акустической жесткости.

Ключевые слова: микросейсм, H/V -отношение, метод Накамуры, резонансные границы, глубинный разрез, микросейсмическое зондирование

Для цитирования: Давыдов В.А. (2019). Малоглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм. *Георесурсы*, 21(1), с. 78-85. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>

Введение

Возможность использования микросейсмического шума для изучения глубинного строения Земли давно занимало умы ученых. Исследования, проведенные в этом направлении, привели к накоплению многочисленного материала, свидетельствующего о корреляционных связях спектральных характеристик микросейсм с различными геологическими объектами и структурами. На базе полученных данных в нашей стране были предложены такие способы исследований геологической среды с помощью пассивной сейсмоки, как метод микросейсмического зондирования (ММЗ) (Горбатиков и др., 2008), АНЧАР (Графов и др., 1996), низкочастотное сейсмическое зондирование (НСЗ) (Бережной и др., 2008) и другие.

Подобные работы интенсивно велись и за рубежом. Еще в середине XX века сейсмологи предполагали, что соотношения радиальных и вертикальных компонент движения частиц функционально зависят от параметров нижележащего слоя: мощности, плотности и скорости сейсмических волн (Voore, Toksoz, 1969). Для изучения этих функциональных зависимостей были использованы “новые” для того времени технологии – спектральный анализ сейсмических колебаний в разных модификациях для продольных (P), поперечных (S) и поверхностных волн (Bath, 1974). Однако широкого развития данные исследования не получили из-за сложности расчетов и неоднозначности результатов.

Метод, базирующийся на оценке соотношения между амплитудными спектрами горизонтальных (H) и вертикальных (V) компонент микросейсмических колебаний, был первоначально предложен японскими сейсмологами Ногоши и Игараси (Nogoshi, Igarashi, 1971). Интерес к дальнейшему изучению этого вопроса появился после статьи их коллеги Накамуры (Nakamura, 1989), в которой он показал, что H/V -отношения амплитудных спектров микросейсм имеют взаимосвязь с динамическими характеристиками геологического разреза. После этой публикации все технологии, использующие H/V спектральные отношения, стали называть методом Накамуры. Несмотря на многочисленные работы в этом направлении (Fäh, 2001; Narayan, 2002; Parolai, Galiana-Merino, 2006), среди геофизиков до сих пор нет общего мнения и полной ясности в этом вопросе. Принятое за основу большинством исследователей объяснение характера H/V -отношений формулируется следующим образом:

- микросейсмический шум главным образом состоит из поверхностных волн (таким образом, вертикальная компонента в основном соответствует релеевской волне);
- эллиптичность (H/V -отношение) волн Релея меняется с частотой f , соответствующей определенным глубинам исследований h ;
- в однородной изотропной среде имеет место пропорциональная зависимость эллиптичности релеевских волн от коэффициента Пуассона;
- в районе контакта двух геологических слоев, более, чем в 2.5 раза отличающихся между собой по акустической

жесткости (импедансу), возникает резонанс поперечных волн с максимальным пиком на частоте (Nakamura, 2000; Chatelain et al., 2008):

$$f_0 = V_S / 4h_0$$

где V_S – скорость поперечных волн в верхнем горизонте; h_0 – глубина залегания контакта слоев.

Это согласуется с теоретическими расчетами поведения волн Рэлея в двухслойной среде (Malischewsky, Scherbaum, 2004). Скорость поперечных волн в верхнем слое можно определить по скорости распространения релеевской волны V_R с учетом коэффициента Пуассона среды (μ) как $V_S = (1 + \mu) \times V_R / (0,87 + 1,12\mu)$ (Пузырев и др., 1985). Для большинства горных пород (при $\mu = 0,25 \div 0,5$) это соотношение соответствует $V_S = 1,05 \div 1,09 \times V_R$.

Таким образом, можно определить глубину залегания резонансной границы по формуле:

$$h_0 = V_S / 4f_0 \approx 1,07 \times V_R / 4f_0$$

где f_0 – частота резонансных колебаний поперечных волн.

В случае стандартного двухслойного разреза, состоящего из поверхностного слоя “рыхлого” грунта и прочного основания (коренных пород), в спектре H/V -отношений должен присутствовать один резонансный пик, по которому можно определить глубину залегания основной геологической границы. В однородном пространстве резонансные явления отсутствуют, и тогда разрезы спектральных отношений характеризуют изменения акустических свойств среды. В неоднородной слоистой среде будет наблюдаться суммарная интерференционная картина, зависящая от упругих параметров отдельных элементов среды, граничных резонансных эффектов и влияния различных волновых мод. Кроме того, на спектральные отношения влияет характер основных источников микросейсмического шума, от которых зависит степень доминирования волн Рэлея в общем сейсмическом отклике (Haghshenas et al., 2008). При изучении верхней части разреза в диапазоне техногенных микросейсмических шумов ($f \geq 1$ Гц), несмотря на множество влияющих факторов, спектральные отношения имеют довольно простой вид. Обычно количество резонансных пиков не превышает двух, поэтому H/V -отношения позволяют выделять только наиболее контрастные структурные элементы геологического строения. Для визуального представления результаты зондирований можно приводить в виде амплитудных спектров $|H/V|(f)$, или спектрограмм вдоль профиля наблюдений, подобным частотным псевдоразрезам. Однако более наглядно использование разрезов эллиптичности микросейсм, трансформированных в диапазон глубин по формуле:

$$h \approx 1,07 \times V_R / 4f$$

Тогда границы разделов можно идентифицировать по глубине и форме залегания в виде линейных аномалий повышенных (пиковых) значений H/V -отношений. По сути явления эти границы следует называть резонансными, а для вычисления глубины их залегания необходимо определить среднюю скорость релеевских волн в вышележащей толще грунтов. Для простого двухслойного разреза это не вызывает затруднений, однако в многослойной среде скорость поверхностных волн имеет зависимость от частоты колебаний. Для учета изменения фазовых скоростей волн Рэлея можно воспользоваться помощью одного из

дисперсионных методов анализа: SASW (Spectral Analysis of Surface Waves – спектральный анализ поверхностных волн) (Heisey et al., 1982), ReMi (Refraction Microtremor – преломление микросейсм) (Louie, 2001), или MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves – многоканальный анализ поверхностных волн) (Park et al., 2007). При этом, для привязки глубины достаточно получить частотную характеристику $V_R(f)$ в нескольких наиболее характерных местах профиля, используя для остальных точек усредненную аппроксимирующую зависимость. После вычисления и внесения поправок за дисперсию скоростей релеевских волн получим более точные положения резонансных границ в многослойном разрезе.

Целью настоящей работы является изучение эллиптичности микросейсмических колебаний для выяснения корректности построения глубинных разрезов на их основе при различных геологических условиях и глубинах залегания границ разделов. К основным задачам исследования относится сопоставление получаемых микросейсмических разрезов с геологическими данными и результатами других геофизических методов.

Методика работ

Полевые наблюдения за микросейсмами проводились на Среднем и Полярном Урале в полосе частот 1-1000 Гц. Этот диапазон позволяет исследовать только верхнюю часть геологического разреза, поэтому данные работы следует характеризовать как малоглубинные сейсмические зондирования (МСЗ). Иногда будет использоваться более общее название – микросейсмические зондирования. Регистрация микросейсмического фона осуществлялись с помощью автономной сейсмической станции на базе универсального геофизического приемника серии OMAP-2 (Давыдов, 2016а). В качестве датчиков использовались низкочастотные вертикальные и горизонтальные сейсмоприемники фирмы Geospace Technologies, закрепленные в одном корпусе. За счет схмотехнической коррекции достигнута линейная амплитудно-частотная характеристика сейсмического тракта во всей области используемых частот. Оптимальное усиление сигнала устанавливалось непосредственно перед началом работы по индикаторам уровня записи. С помощью программы SpectraLAB (Sound Technology Inc., США) в реальном масштабе времени проводилось быстрое преобразование Фурье (БПФ) V/H -отношений в режиме непрерывного усреднения последовательно вычисляемых спектров, с выводом на экран ноутбука для контроля. Частота дискретизации составляла 4 кГц, размер блока данных БПФ – 8192 точки, сглаживающее окно Ханнинга (Hanning). Экспериментальные исследования формы получаемых спектров при разной длительности записи (до одного часа) показали, что спектральные отношения переставали существенно изменяться уже после двух-трехминутной регистрации с накоплением. Стандартные наблюдения выполнялись путем непрерывной двухканальной регистрации микросейсмических шумов в течение от 3 до 15 минут на каждой точке. Более длительное время записи использовалось для возможности отбраковки импульсных помех от близких техногенных источников при постобработке. Информация в реальном времени проходила аналого-цифровое преобразование и сохранялась во флэш-памяти (SD-карте)

цифрового регистратора или ноутбука в виде файлов в импульсно-кодовой модуляции. По окончании полевых работ записи временных рядов переписывались, редактировались и обрабатывались в камеральных условиях с помощью специального пакета программ. Основным информационным материалом служили амплитудные спектры компонент микросейсмического сигнала и их отношений, получаемые с помощью быстрого преобразования Фурье (Рис. 1).

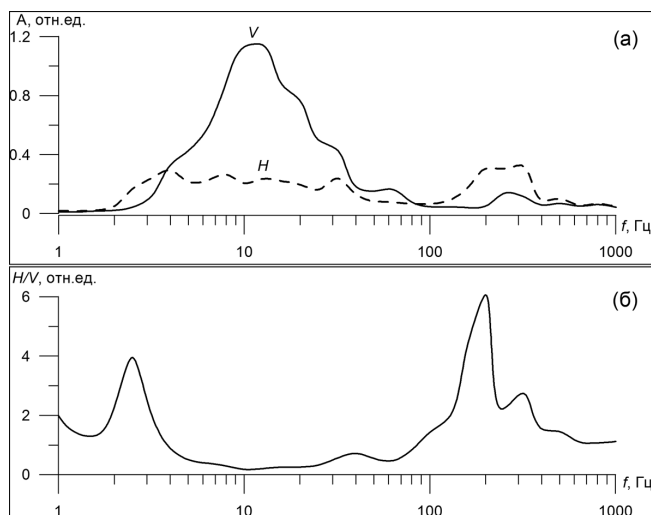


Рис. 1. Амплитудные спектры микросейсмических колебаний: а) горизонтальные (H) и вертикальные (V) компоненты сигналов; б) H/V-отношение (эллиптичность)

Для визуализации конечных результатов спектральные отношения переводились из частотной области в диапазон глубин с учетом дисперсии скорости фундаментальной моды релеевских волн. Опытно-методические работы по изучению микросейсм обычно сопровождалась комплексными геофизическими работами, либо проводились в местах, где такие работы были сделаны ранее. Поэтому дисперсия скоростей волн Релея учитывалась на основании имеющихся данных малоуглубинной сейсморазведки. Главным методом сейсмических исследований при этом являлся метод преломленных волн (МПВ), конечным результатом которого является получение скоростных сейсмических разрезов продольных волн (V_p) и определение конфигурации преломляющих границ. Сейсморазведочные работы проводились портативной цифровой сейсмостанцией Синус-24М (Сенин, Сенина, 2005) по разработанной ранее методике комбинированных наблюдений МПВ и MASW (Давыдов, 2010), с помощью системы встречных и нагоняющих годографов. Другие виды геофизических исследований выполнялись по стандартным методикам, в соответствии с рекомендациями и инструкциями по проведению соответствующих видов работ.

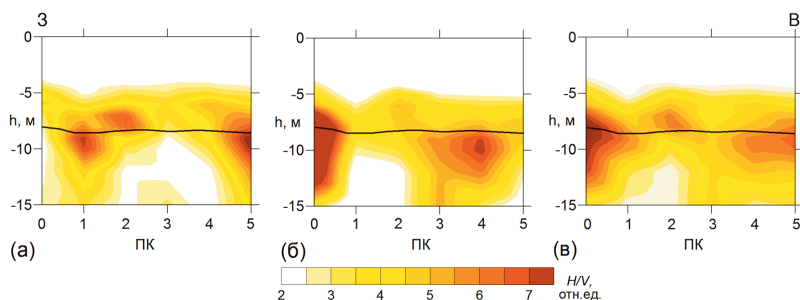


Рис. 2. Разрезы эллиптичности микросейсм при разных азимутах установки горизонтального сейсмоприемника: а) разрез H_x/V_x -отношений в широтном направлении; б) разрез H_y/V_y -отношений в меридиональном направлении; в) суммарный разрез H_z/V_z -отношений. Сплошной черной линией показана преломляющая граница. Нумерация пикетов (ПК) кратна 10 метрам.

Анализ полученных разрезов эллиптичности микросейсм осуществлялся путем их сравнения с геологическими данными, а также с результатами проведенных геофизических работ, преимущественно сейсморазведочными. Далее на конкретных примерах рассмотрены основные особенности глубинных микросейсмических разрезов, построенных с использованием спектральных отношений.

Результаты исследований

При равномерном распределении единичных источников микросейсм в однородной среде горизонтальные колебания в любом направлении статистически равнозначны. В реальных средах плотность распределения источников микросейсмического шума неравномерна, при этом присутствуют локальные рассеивающие неоднородности среды. Для упрощения технологии наблюдений нужно решить вопрос, насколько сильно отличаются разрезы спектральных отношений при изменении азимута горизонтальной компоненты. Чтобы это выяснить, были проведены опытно-методические работы на ряде различных геологических объектов. В ходе работ выяснилось, что в большинстве случаев изменяются только амплитуды горизонтальных компонент, а сама форма спектра остается относительно стабильной. Т.е. разрезы спектральных отношений сохраняют свои основные характерные особенности вне зависимости от азимута горизонтальной составляющей сигнала. Это демонстрируют представленные ниже результаты, полученные на Новоалексеевском массиве (Рис. 2).

В основании разреза залегают габбро и габбро-диориты, перекрытые озерно-болотными отложениями. По данным сейсморазведки МПВ преломляющая граница, соответствующая кровле коренных пород, располагается горизонтально на глубине около 8 метров. Полученные изображения резонансных границ при разных азимутах установки горизонтального сейсмоприемника отличаются между собой в деталях, но соответствуют одной глубине залегания. Абсолютная амплитуда горизонтальных колебаний соответствует геометрической сумме двух ортогональных компонент в горизонтальной плоскости. При использовании одного горизонтального сейсмометра его необходимо устанавливать в направлении основных источников микросейсмического шума (дорог, водоемов, деревьев и т.п.), тогда измеряемая компонента будет наиболее близка к абсолютному значению. На представленных рисунках видно, что все горизонтальные резонансные границы раздела выглядят более хаотично, чем сейсмическая преломляющая граница. Результат может свидетельствовать о влиянии других физико-механических параметров среды и области контакта при специфических условиях залегания грунтов. В данном случае

флуктуации резонансной границы, возможно, связаны со скоростными неоднородностями покровных отложений, в составе которых присутствуют линзы торфа. Полученные микросейсмические разрезы также указывают на существование резонанса сейсмических волн в вертикальной плоскости. Этот эффект более подробно рассматривается в конце статьи.

При отсутствии контрастных горизонтальных границ резонансные явления возникать не должны. На некоторых исследованных автором массивах Урала резонансные пики эллиптичности микросейсм либо не проявлялись вообще, либо наблюдались очень редко (Давыдов, 2015). Это объясняется достаточно однородным составом коренных пород и покрывающих их образований. Чаще всего такая ситуация характерна для интрузивных массивов, приуроченных к возвышенностям и покрытых мало-мощной слабоизмененной корой выветривания. Переход коренных горных пород к породам коры выветривания может быть настолько равномерным, что приводит к отсутствию значимого градиента акустических импедансов, необходимого для возникновения резонанса поперечных волн. Монотонные изменения упругих свойств в переходной зоне нередко мешают выделению и преломляющих сейсмических границ. Годографы преломленных волн указывают на плавное нарастание сейсмических скоростей с глубиной (рефракция), что обычно характерно для градиентной среды. Исходя из теории релеевских волн, в однородной среде резонансные явления отсутствуют, а спектральные отношения имеют прямую зависимость от упругих параметров среды, к примеру, величина эллиптичности (H/V) обратно пропорциональна коэффициенту Пуассона. При максимальных изменениях коэффициента Пуассона от 0.5 до нуля теоретические значения H/V -отношений в однородной среде лежат приблизительно в пределах $0.55 \div 0.8$ (Tuan, 2009). На практике диапазон значительно шире, что связано с резонансами разных видов сейсмических волн, при которых могут многократно возрастать как горизонтальные, так и вертикальные компоненты колебаний. Вследствие этого, представляется довольно проблематичным проводить какие-либо количественные корреляционные связи спектральных отношений ортогональных составляющих микросейсм с упругими параметрами среды. Более эффективно выделять аномальные эффекты, возникающие на границах раздела сред, тем более, что на большинстве разрезов они присутствуют.

Следующие два примера демонстрирует присутствие

значимых резонансов поперечных волн на границах скальных оснований, перекрытых рыхлыми отложениями. Оба примера получены на территории Березовского рудного поля в Свердловской области. Березовское месторождение является крупнейшим на Урале золоторудным объектом классического кварц-жильного типа. Горные выработки проходят по дайкам гранитоид-порфиров, содержащих золотоносные кварцевые жилы. Вмещающими породами рудного поля являются вулканиты и вулканогенно-осадочные толщи океанического комплекса (Сазонов и др., 1999). До революции интенсивно разрабатывалась кора выветривания гранитоидов вблизи поверхности и на глубину до двух десятков метров. В подобном месте, в районе старых горных выработок, и проведены комплексные сейсмические исследования. Четвертичные породы в разрезе участка представлены слоем элювиальных суглинков и супесей, которые, в свою очередь, перекрыты делювиальными отложениями и насыпными грунтами. По результатам сейсморазведки МПВ на скоростном разрезе уверенно выделяется преломляющая граница, отделяющая коренные породы от покрывающих их рыхлых образований (Рис. 3).

Микросейсмические зондирования также однозначно свидетельствуют о наличии резонансной границы на тех же глубинах (Рис. 3а). Эллиптичность микросейсм изменяется в широких пределах ($H/V = 2.5 \div 6$), что говорит о неоднородности значений акустических жесткостей контактирующих сред. Тем не менее, разница величин довольно высокая и аномальный эффект проявляется на протяжении всего профиля, без разрывов резонансной границы. Повышенные значения H/V -отношений могут служить одним из признаков идентификации подземных выработок, так как граница подработанного пространства является очень контрастной по акустическим свойствам двух сред.

Следующий участок исследований находится на северной периферии Березовского рудного поля, в пределах Пышминско-Березовского гипербазитового массива, сложенного серпентинитами. Здесь поведение эллиптичности микросейсмического фона над слоистой средой указывает на различие физических принципов выделения резонансных и преломляющих границ (Рис. 4).

В начале профиля (ПК0-10) эти границы практически совпадают, затем в районе уступа коренных пород (ПК32) преломляющая граница испытывает перепад, а резонансная почти не меняется. Вертикальная неоднородность

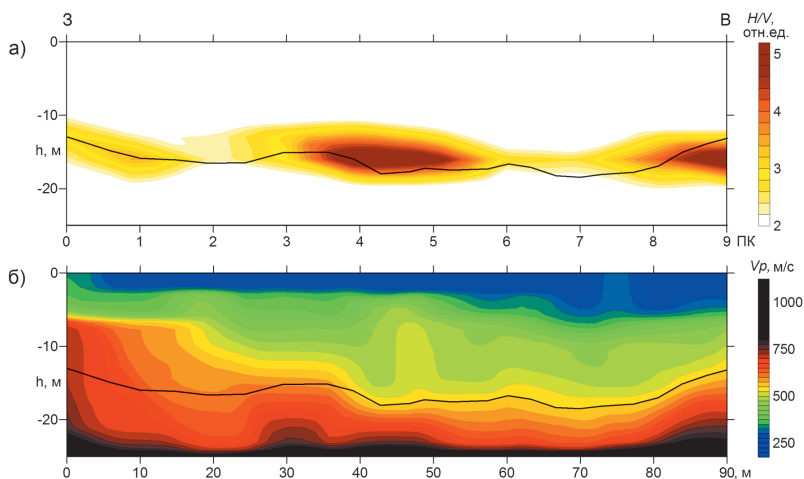


Рис. 3. Сопоставление результатов малоглубинных сейсмических зондирований (МСЗ) и сейсморазведки МПВ в районе старых горных выработок Березовского месторождения золота (Средний Урал): а) разрез H/V -отношений; б) скоростной сейсмический разрез продольных волн. Сплошной линией показана преломляющая граница.

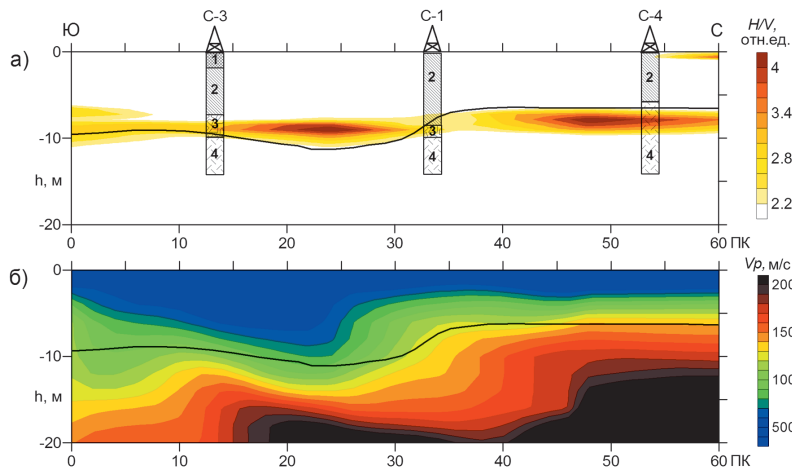


Рис. 4. Сопоставление результатов МСЗ и сейсморазведки МПВ на участке развития серпентинитов: а) разрез N/V -отношений; б) скоростной сейсмический разрез продольных волн. Сплошной линией показана преломляющая граница. Обозначения геологических колонок: 1) насыпной грунт; 2) суглинок; 3) древесно-щебенчатый грунт; 4) серпентиниты трещиноватые.

вблизи уступа отмечается понижением эллиптичности, почти до полного исчезновения аномалии. В районе ПК40-60 обе границы становятся горизонтальными, но на разных уровнях, с разницей приблизительно в полтора метра. Данные несоответствия можно объяснить отличием в поведении различных типов сейсмических волн. Преломляющая граница вычислена по годографам продольных волн, а граница, выделяемая пиковыми значениями эллиптичности микросейсм, обусловлена резонансом поперечных волн. Известно, что поведение продольных и поперечных волн в неоднородной среде может отличаться друг от друга, что и наблюдается на приведенном примере. Данные по бурению указывают на то, что результаты сейсморазведки МПВ более достоверны, поскольку преломляющая граница точнее определяет глубину залегания коренных пород, чем резонансная граница (Рис. 4).

Следующий пример был получен на Пышминско-Ключевском рудном поле. Пышминский медный рудник функционировал с середины XIX века до 1976 года. Рудоносные зоны месторождения имеют субмеридиональное простирание и залегают в вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах среднего и основного состава. Кроме меди на руднике добывались кобальт, золото и серебро. К разработке верховых руд привлекались старатели, поэтому вся территория рудного поля подверглась подработке. Исследовательский профиль проходил в области старых горных выработок не глубокого заложения. Малоглубинной сейсморазведкой выявлены две преломляющие границы и резкие перепады рельефа поверхности коренных пород, представленных порфировыми андезито-базальтами (Рис. 5).

Уверенно наблюдается возникновение двух резонансных границ на глубинах, соответствующих преломляющим горизонтам. Следует отметить высокую контрастность выделения горизонтальных границ обнаруженных выработок в интервале 60-80 метров и в конце профиля (Рис. 5а). Замечено, что наибольшая интенсивность резонанса приурочена к небольшим ложбинам и угловым участкам изменения поверхности геологических границ.

В перечень изучаемых автором с помощью МСЗ объектов входят грунтовые плотины, которым была посвящена отдельная статья. Основные выводы, сделанные в этой публикации (Давыдов, 2016б), следующие:

- микросейсмические зондирования, основанные на изучении горизонтальных и вертикальных компонент колебаний, позволяют выделять основные черты глубинного строения грунтовых плотин;
- по результатам сравнения резонансные границы в половине случаев совпадают с преломляющими сейсмическими границами, но отличаются крайней невыдержанностью;
- кроме резонанса поперечных волн могут существовать резонансы других сейсмических волн, характеризующиеся значительным доминированием амплитуды вертикальных смещений над горизонтальными;
- искусственные сооружения в теле плотин (водосбросы, колодцы и т.п.) имеют свои характерные резонансные частоты, связанные с собственными колебаниями отдельных элементов конструкций.

Основные положения приведенного заключения можно продемонстрировать на примере изучения маловысотной плотины сельского пруда на р. Арамилке (Рис. 6).

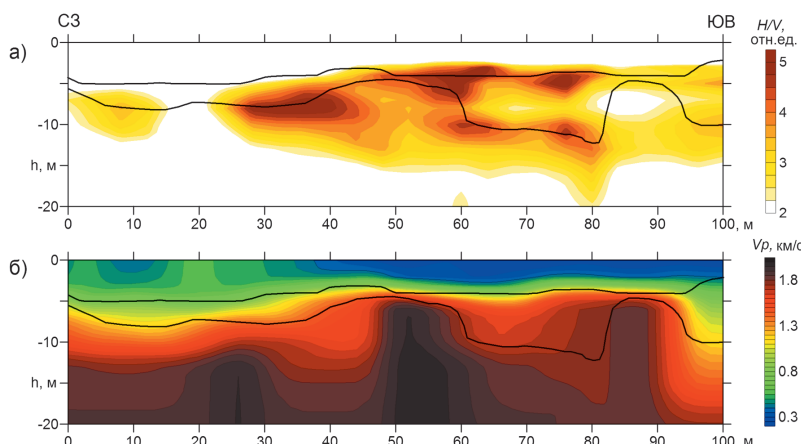


Рис. 5. Сопоставление результатов микросейсмических зондирований и сейсморазведки МПВ в районе горных выработок Пышминско-Ключевского медно-кобальтового месторождения (Средний Урал): а) разрез N/V -отношений; б) скоростной сейсмический разрез продольных волн. Сплошной линией показаны преломляющие границы.

К особенностям микросейсмического разреза следует отнести аномалию в районе водослива, обусловленную резонансом конструкции. Резонансная граница в основании плотины приблизительно совпадает с преломляющей границей, но отличается сильной прерывистостью. Она существует скорее в виде отдельных площадок, в которых величина резонанса $H/V \geq 2$. В таких условиях затруднительно четко выделить насыпную часть плотины без дополнительных методов исследований, к примеру, таких, как малоглубинная сейсморазведка или электромагнитные зондирования (Рис. 6б). Нечеткость резонансных границ на плотинах объясняется полной водонасыщенностью контакта между основанием и насыпной частью, из-за чего перепад сейсмических скоростей и, соответственно, акустических импедансов, недостаточно резкий. Практика показывает, что на характер и величину резонансных пиков спектральных отношений оказывают влияние вещественный состав коренных пород, гранулометрический состав рыхлых отложений, пористость, водонасыщенность и множество других факторов.

Как уже было замечено, резонансные явления могут присутствовать не только на горизонтальных границах раздела, но и на вертикальных. Прежде всего, это относится к контактам горных пород, отличающихся по составу, например, габбро и гранитов (Рис. 7).

Положение контакта двух интрузий (ПК20) уверенно определяется по данным радиометрии, так как граниты обычно имеют более высокую гамма-активность по сравнению с габбро. На разрезе H/V -отношений этот контакт выглядит в виде вертикальной аномалии повышенных значений эллиптичности, горизонтальная аномалия соответствует кровле коренных пород. Коренные породы покрыты

чехлом рыхлых отложений мощностью 6-7 метров в районе распространения габбро (ПК0-20), увеличиваясь до 10-12 метров над гранитами (ПК20-40). Субгоризонтальная граница покровных отложений хорошо выделяется вблизи контакта двух массивов и исчезает через 150 метров по обе стороны от него. Такое поведение резонансных границ может быть связано с частичной обводненностью зоны соприкосновения пород, увеличивающей контраст акустических жесткостей. На дальних расстояниях от границы массивов, по-видимому, происходит более плавное изменение упругих свойств от скальных грунтов к рыхлым отложениям. В результате чего резонанс не возникает, и горизонтальная граница раздела не проявляется с помощью МСЗ. Из других особенностей разреза следует отметить, что широкая аномальная область в районе пикетов ПК10-20 принадлежит к приконтактной зоне измененных горных пород, обладающих повышенной трещиноватостью.

Тектонические нарушения на микросейсмических разрезах также выделяются повышенными значениями эллиптичности. При этом аномалии могут проявляться в верхней части разреза и отсутствовать на глубине. Так, на Енгайском участке массива Рай-Из с поверхности было выделено два тектонических разрыва, характеризующихся сильной дезинтеграцией и расланцеванием дунит-гарцбургитового комплекса пород (Рис. 8).

По результатам индукционных зондирований выяснено, что распространение одной из тектонических трещин (ПК2-4) в глубину составляет более 40 метров. Однако соответствующая вертикальная аномалия эллиптичности отобразилась в разрезе только до глубины около 15 метров. Глубина заложения другого нарушения (ПК10) по результатам микросейсмических и индукционных

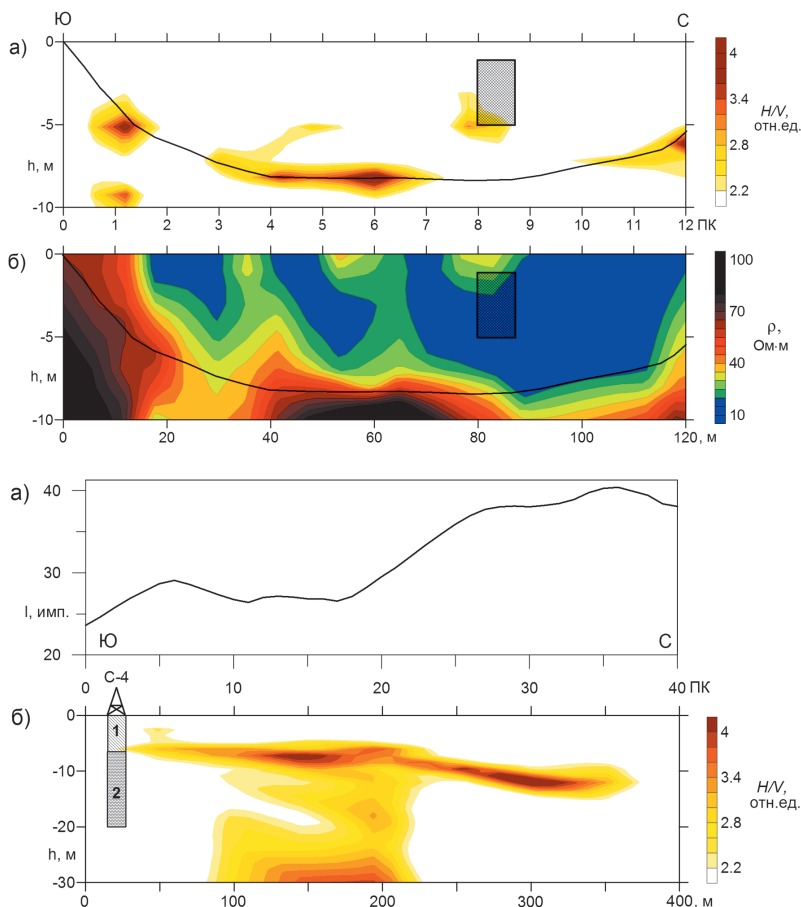


Рис. 6. Сопоставление результатов микросейсмических и электрических зондирований на плотине р. Арамилка: а) разрез спектральных H/V -отношений; б) двухмерный геоэлектрический разрез (ρ – удельное электрическое сопротивление). Сплошной линией показана преломляющая граница, заштрихованная область соответствует водосливу.

Рис. 7. Результаты геофизических работ в районе контакта Новоалексеевского габбрового и Верх-Исетского гранитного массивов (Средний Урал): а) график интенсивности радиационного фона; б) разрез H/V -отношений. Обозначения геологической колонки: 1) суглинок делювиальный; 2) габбро.

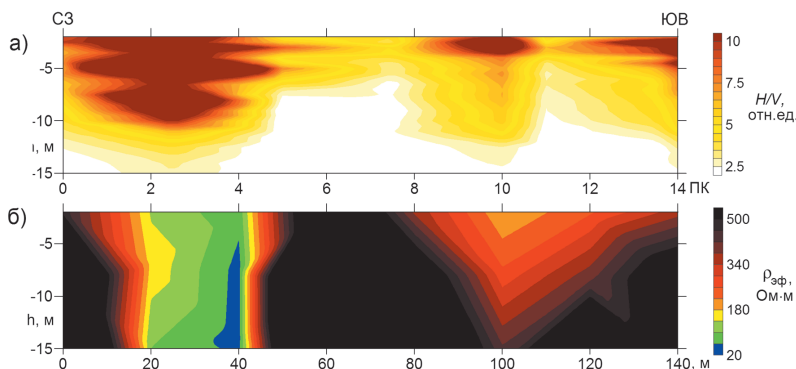


Рис. 8. Результаты геофизических исследований на Енгайском участке ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал): а) разрез спектральных H/V -отношений; б) разрез эффективных (кажущихся) сопротивлений.

зондирований приблизительно совпадает. Резонансные явления на вертикальных границах разделов пока мало исследованы, поэтому рано делать по этому поводу какие-либо заключения. Главное, что они существуют и требуют дальнейшего изучения.

Выводы

Представленные результаты свидетельствуют о сложном характере эллиптичности микросейсмического шума в разных условиях, однако позволяют в ряде случаев определить основные границы раздела верхней части геологического разреза. Выделяемые с помощью микросейсм резонансные границы часто располагаются вблизи с преломляющими сейсмическими границами или совпадают с ними. Это вполне согласуется с теорией, согласно которой и резонансные эффекты, и преломленные волны возникают на границе двух сред с большим контрастом акустической жесткости. Несовпадение границ, получаемых в результате резонанса поперечных (S) волн и преломляющих границ, найденных по годографам продольных (P) волн, вероятно, связано с различием поведения P и S волн в неоднородных средах. Отсутствие резонансных пиков эллиптичности микросейсм может свидетельствовать либо об однородности среды, либо о плавных изменениях акустических свойств на границах разделов, препятствующих возникновению резонанса.

В ходе экспериментальных работ выяснено, что при изменении азимута горизонтального сейсмометра обычно меняется амплитуда соответствующей компоненты сигнала, однако форма спектра остается относительно стабильной. Таким образом, разрезы спектральных отношений сохраняют свои основные характерные особенности вне зависимости от направленности наблюдений.

Технологию малоуглубинных сейсмических зондирований на основе изучения эллиптичности микросейсм желателен применять в комплексе с другими геофизическими методами. При интерпретации необходимо руководствоваться опытом ранее выполненных работ на ближайших аналогах, а также проводить параметрические исследования на контрольных профилях с известным геологическим строением.

Литература

- Бережной, Д.В., Бириальцева Е.В., Бириальцева Т.Е. и др. (2008). Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды. Казань: Изд-во КГУ, с. 360-386.
- Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. (2008). Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм. *Физика Земли*, 7, с. 66-84.
- Графов Б.М., Арутюнов С.Л., Казаринов В.Е. и др. (1996). Анализ

геоакустического излучения низкочастотной залежи при использовании технологии АНЧАР. *Геофизика*, 5, с.24-28.

Давыдов В.А. (2010). Применение малоуглубинной сейсморазведки для изучения подработанных территорий. *Изв. вузов. Горный журнал*, 4, с. 111-116.

Давыдов В.А. (2015). Спектральный анализ данных микросейсмических зондирований. *Геофизика*, 1, с. 72-77.

Давыдов В.А. (2016а). Универсальный полевой геофизический прибор ОМАР-2. *Приборы и техника эксперимента*, 6, с. 127-128.

Давыдов В.А. (2016б). Микросейсмическое зондирование грунтовых плотин на основе изучения ортогональных компонент колебаний. *Инженерные изыскания*, 5-6, с. 46-51.

Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю. и др. (1985). Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М: Недра, 277 с.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (1999). Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГТА, 570 с.

Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. (2005). Сейсмическая станция «Синус». *Приборы и техника эксперимента*, 5, с. 162-163.

Bath M. (1974). Spectral analysis in geophysics. *Developments in Solid Earth Geophysics*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 579 p.

Boore D.M., Toksoz M.N. (1969). Rayleigh wave particle motion and crustal structure. *Bull. of the Seismological Society of America*, 59(1), pp. 331-346.

Chatelain J.C., Guillier B., Cara F., Duval A.M., Atakan K., Bard P.Y., and the WP02 SESAME team. (2008). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bull. Earthquake Eng.*, 6(1), pp. 33-74. DOI: 10.1007/s10518-007-9040-7

Fäh D., Kind F., Giardini D. (2001). A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophys. J. Int.*, 145, pp. 535-549. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01406.x>

Haghshenas E., Bard P.Y., Theodulidis N., SESAME WP04 Team. (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bull. Earthquake Eng.*, 6(1), pp. 75-108. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9058-x>

Heisey J.S., Stokoe K.H., Hudson W.R., Meyer A.H. (1982). Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves. Univ. of Texas at Austin, Center for Transportation Research, Research Report 256-2, 277 p.

Louie J.N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), pp. 347-364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>

Malishevsky P.G., Scherbaum F. (2004). Love's formula and H/V-ratio (ellipticity) of Rayleigh waves. *Wave Motion*, 40, pp. 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2003.12.015>

Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), pp. 25-33.

Nakamura Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proc. XII World Conf. Earthquake Engineering*. New Zealand, Paper N 2656, 8 p.

Narayan J.P. (2002). H/V ratio and amplification factor: a numerical experiment using 2.5D modelling. *Geofizika*, 18-19, pp. 1-16.

Nogoshi M., Igarashi T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (in Japanese with english abstract). *Journal of seismological Society of Japan*, 24, pp. 26-40. https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1_26

Park C.B., Miller R.D., Xia J., Ivanov J.A. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods. *The Leading Edge*, 26, pp. 60-64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>

Parolai S., Galiana-Merino J.J. (2006). Effect of Transient Seismic Noise on Estimates of H/V Spectral Ratios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), pp. 228-236. <https://doi.org/10.1785/0120050084>

Tuan T.T. (2009). The ellipticity (H/V-ratio) of Rayleigh surface waves. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium. Friedrich-Schiller-Universität Jena, 119 p.

Сведения об авторе

Вадим Анатольевич Давыдов – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

Статья поступила в редакцию 25.04.2018;
Принята к публикации 25.11.2018;
Опубликована 30.03.2019

IN ENGLISH

Shallow seismic sounding based on ellipticity analysis of microtremor

V.A. Davydov

Bulashevich Geophysics Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation
E-mail: davyde@yandex.ru

Abstract. A brief review is carried out of the previous study about the spectral ratios of horizontal and vertical components of microseismic oscillations displacement. The basic principles of resonant boundaries allocation and the construction of deep sections based on the H/V relations (ellipticity) are considered. A description of the equipment used, the method of recording and processing microseismic noise are presented. The main goal of the research work is to clarify the nature of the connection between the ellipticity of microseisms with geological features and the correctness of constructing deep sections based on them. The initial data are the amplitude spectra of the components of microseismic signal, obtained using the fast Fourier transformation. In the course of experimental work it was found that the spectral relations retain their characteristic features regardless of the azimuth of observations. A number of practical examples compare microseismic sections with results from other geophysical methods and drilling information. The results obtained indicate the complex nature of the ellipticity of microseismic noise under different conditions, however, they make it possible to determine the main interfaces between the upper part of the geological section. Resonant boundaries emitted by microtremor are often located near refractive seismic boundaries. This is consistent with the theory that resonance effects occur at the interface between two media with a high contrast of acoustic impedance.

Keywords: microtremor, H/V-ratio, Nakamura's technique, resonant boundaries, deep section, microseismic sounding

Recommended citation: Davydov V.A. (2019). Shallow seismic sounding based on ellipticity analysis of microtremor. *Georesursy = Georesources*, 21(1), pp. 78-85. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>

References

- Berezhnoy, D.V., Biryaltcev E.V., Biryaltceva T.E., et. al. (2008). Analiz spektral'nykh harakteristik mikroseyism kak metod izucheniya struktury geologicheskoy sredy [The analysis of spectral characteristics of microseisms as a study method of structure of geologic environment]. Kazan: KGU Publ., pp. 360-386. (In Russ.)
- Bath M. (1974). Spectral analysis in geophysics. *Developments in Solid Earth Geophysics*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 579 p.
- Boore D.M., Toksoz M.N. (1969). Rayleigh wave particle motion and crustal structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(1), pp. 331-346.
- Chatelain J.C., Guillier B., Cara F., Duval A.M., Atakan K., Bard P.Y., and the WP02 SESAME team. (2008). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bull. Earthquake Eng.*, 6(1), pp. 33-74. DOI: 10.1007/s10518-007-9040-7
- Davydov V.A. (2010). Application of shallow seismic exploration for the study of developed areas. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 4, pp. 111-116. (In Russ.)
- Davydov V.A. (2015). The spectral analysis of data of microseismic sounding. *Geofizika*, 1, pp. 72-77. (In Russ.)
- Davydov V.A. (2016a). Universal field geophysical receiver OMAR-2. *Pribery i tehnika eksperimenta*, 6, pp. 127-128. (In Russ.)
- Davydov V.A. (2016b). Microseismic sounding of Earth dams on the basis of studying orthogonal components of vibrations. *Inzhenernye izyskaniya*, 5-6, pp. 46-51. (In Russ.)
- Fäh D., Kind F., Giardini D. (2001). A theoretical investigation

of average H/V ratios. *Geophys. J. Int.*, 145, pp. 535-549. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01406.x>

Gorbatikov A.V., Stepanova M.Ju., Korablev G.E. (2008). Regularities of microseismic field formation under the influence of local geologic inhomogeneity and sounding of environment by means of microseisms. *Fizika Zemli*, 7, pp. 66-84. (In Russ.)

Grafov B.M., Arutjunov S.L., Kazarinov V.E., et. al. (1996). The analysis of geoaoustic radiation of a low-frequency deposit during the use of ANCHAR technology. *Geofizika*, 5, pp. 24-28. (In Russ.)

Haghshenas E., Bard P.Y., Theodulidis N., SESAME WP04 Team. (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bull. Earthquake Eng.*, 6(1), pp. 75-108. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9058-x>

Heisey J.S., Stokoe K.H., Hudson W.R., Meyer A.H. (1982). Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves. Univ. of Texas at Austin, Center for Transportation Research, Research Report 256-2, 277 p.

Louie J.N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), pp. 347-364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>

Malischewsky P.G., Scherbaum F. (2004). Love's formula and H/V-ratio (ellipticity) of Rayleigh waves. *Wave Motion*, 40, pp. 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2003.12.015>

Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), pp. 25-33.

Nakamura Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proc. XII World Conf. Earthquake Engineering*. New Zealand, Paper N 2656, 8 p.

Narayan J.P. (2002). H/V ratio and amplification factor: a numerical experiment using 2.5D modelling. *Geofizika*, 18-19, pp. 1-16.

Nogoshi M., Igarashi T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (in Japanese with english abstract). *Journal of seismological Society of Japan*, 24, pp. 26-40. https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1_26

Park C.B., Miller R.D., Xia J., Ivanov J.A. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods. *The Leading Edge*, 26, pp. 60-64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>

Parolai S., Galiana-Merino J.J. (2006). Effect of Transient Seismic Noise on Estimates of H/V Spectral Ratios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), pp. 228-236. <https://doi.org/10.1785/0120050084>

Puzryev N.N., Trigubov A.V., Brodov L.Ju., et. al. (1985). Seismicheskaya razvedka metodom poperechnykh i obmennykh voln [Seismic prospecting by a method of transverse and converted waves]. Moscow: Nedra, 277 p. (In Russ.)

Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Ju.A. (1999). Mestorozhdeniya zolota Urala [Gold deposits of the Urals]. Ekaterinburg: UGGGA, 570 p. (In Russ.)

Senin L.N., Senina T.E. (2005). Seismic station «Sinus». *Pribery i tehnika eksperimenta*, 5, pp. 162-163. (In Russ.)

Tuan T.T. (2009). The ellipticity (H/V-ratio) of Rayleigh surface waves. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium. Friedrich-Schiller-Universität Jena, 119 p.

About the author

Vadim A. Davydov – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Bulashevich Geophysics Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
100, Amundsen st., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

Manuscript received 25 April 2018;
Accepted 25 November 2018;
Published 30 March 2019