

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ГРУНТОВ ПРИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЯХ ПЛОТИН

© 2023 В.А. Давыдов

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 620016;
e-mail: davyde@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.; после доработки 16.05.2023 г.; принята в печать 26.06.2023 г.

Приводятся базовые основы спектрального анализа горизонтальных и вертикальных компонент микросейсмических шумов для изучения геологического строения плотин. Рассматриваются вопросы построения глубинных разрезов трех динамических параметров микросейсм. Целью работы является изучение сейсмической реакции грунтов при проведении микросейсмических зондирований гидротехнических сооружений. К основным задачам исследований относится сопоставление глубинных разрезов коэффициентов усиления грунтов с разрезами передаточных отношений и данными других геофизических методов. В результате микросейсмических зондирований трех гидротехнических сооружений выяснено, что сейсмическая реакция глинистого ядра плотин существенно отличается от окружающих грунтов. Коэффициенты усиления в коренных породах и дисперсных грунтах зоны аэрации характеризуются минимальными величинами. Для водонасыщенных глин эти значения в 5–10 раз выше, что может свидетельствовать о том, что основной причиной усиления уровня микросейсмических шумов является увеличение общей пористости и влажности грунтов. Отмечено, что коэффициенты усиления горизонтальных микросейсм являются более помехоустойчивыми и детальными по сравнению с параметрами вертикальных микросейсм. Констатируется, что глубинные разрезы динамических параметров микросейсм позволяют уверенно выделять основные элементы строения грунтовых плотин, а также выявлять вероятные зоны повышенной фильтрации.

Ключевые слова: микросейсм, динамические характеристики, спектральное усиление, H/V -отношения, плотины.

ВВЕДЕНИЕ

На территории России функционирует огромное количество гидротехнических сооружений (ГТС), в том числе насыпных грунтовых плотин и дамб водохранилищ. В соответствии с Федеральным законом № 117-ФЗ от 21 июля 1997 г. «О безопасности гидротехнических сооружений», эксплуатирующие организации должны осуществлять мониторинг технического состояния плотин по ряду контролируемых показателей. Одними из показателей сейсмической устойчивости ГТС могут являться динамические параметры микросейсм. С их помощью можно оценить и выявить зоны резких изменений характеристик грунтов в теле плотин.

Основным методом исследования микросейсм является спектральный анализ. Применение спектрального анализа сейсмических

волн для изучения строения земной коры было положено во второй половине XX в. Обширная информация по этому вопросу изложена в книге шведского сейсмолога Маркуса Бата (Bath, 1974). В настоящее время спектральный анализ является рядовой процедурой обработки сигналов, что привело к накоплению многочисленного материала, свидетельствующего о связи амплитудных спектров микросейсмических колебаний с особенностями геологического разреза. Для учета влияния источника сигнала, регистрирующего устройства, а также пути пробега волны, используется различная нормализация спектров. Одним из способов нормирования спектров является отношение профильных наблюдений к измерениям на контрольном пункте (КП). Получаемая величина называется коэффициентом спектрального усиления или сейсмической реакцией грунта (Табулевиц, 1986). Следует

отметить, что пункты наблюдения и КП должны находиться на достаточно близком расстоянии друг от друга, чтобы соответствовать условию единства источников сигналов и минимизировать разницу путей прохождения сейсмических волн. Таким образом, сейсмическая реакция грунта будет показывать изменение характера геологического строения относительно КП:

$$J(f) = S(f)/S(f)_0, \quad (1)$$

где $S(f)$ — амплитудный спектр микросейсм в пункте наблюдений;

$S(f)_0$ — фоновый спектр микросейсмического шума в контрольном пункте;

f — частота колебаний.

Для коэффициентов спектрального усиления горизонтальных и вертикальных компонент микросейсм можно соответственно записать:

$$J_H(f) = S_H(f)/S_H(f)_0; \quad J_V(f) = S_V(f)/S_V(f)_0 \quad (2)$$

Контрольный пункт устанавливается обычно в районе развития «эталонных» грунтов, характеризующихся минимальной мощностью рыхлых отложений. Спектральное усиление микросейсм используется на практике при сейсмическом микрорайонировании (Алешин, 2010), изучении глубинного строения Земли (Пупатенко и др., 2021; Рогожин и др., 2020) и для инженерных изысканий (Давыдов, 2019; Калинина и др., 2008).

Другим способом нормирования является отношение спектров горизонтальных (H) и вертикальных (V) компонент микросейсм в одной точке измерений, называемое передаточным (или спектральным) отношением:

$$H/V = S_H(f)/S_V(f), \quad (3)$$

где $S_H(f)$ — спектр горизонтальных компонент микросейсм в пункте наблюдений;

$S_V(f)$ — спектр вертикальных компонент микросейсм в пункте наблюдений.

При данной нормировке устраняются как различия спектральных характеристик источников сигналов, так и путей их распространения. Интерес к методу передаточных отношений возрос после публикации японского сейсмолога Накамуры (Nakamura), в которой он указал на взаимосвязь H/V -отношений с динамическими характеристиками геологического разреза (Nakamura, 1989). После этого за технологиями, использующими H/V спектральные отношения (Horizontal to Vertical Spectral Ratio — HVSR) закрепилось название — метода Накамуры (Nakamura, 2019). Несмотря на многочисленные работы в этом направлении (Chatelain et al., 2008; Fäh, 2001; Haghshenas et al. 2008; Parolai, Galiana-Merino, 2006), характер H/V -отношений не нашел точного толкования, и среди геофизиков до сих пор нет общего мнения и полной ясности в этом вопросе. Поскольку основной вклад в микро-

сейсмический шум вносят поверхностные волны Рэлея, большинство считают, что HVSR является одним из выражений их эллиптичности.

Целью настоящей работы является изучение сейсмической реакции грунтов в вертикальной и горизонтальной плоскости при проведении микросейсмических зондирований плотин, для выяснения особенностей построения глубинных разрезов на их основе. К основным задачам исследований относится сопоставление глубинных разрезов, полученных на основе спектральных отношений микросейсм с результатами других геофизических методов.

К вопросу о глубине микросейсмических зондирований. Микросейсмический фон является суперпозицией множества источников, находящихся на разных расстояниях от точки наблюдения. Вследствие затухания в среде, чем ниже частота, тем более дальним будет пробег сейсмических волн. Т.е. высокочастотные сигналы характеризуют малые глубины, с понижением частоты длина пробега, а соответственно и глубина проникновения, будет возрастать. Таким образом, динамические параметры микросейсм на разных частотах соответствуют определенным глубинам исследований, а измерив их спектральный состав, можно реализовать вариант зондирования. Для перевода частотной области в диапазон глубин необходимо знать скорость распространения сейсмической волны. Для метода Накамуры используется модель слоя на полупространстве, на границе которого возникает резонанс поперечных волн с частотой:

$$f_0 = V_s/4h_0, \quad (4)$$

где V_s — скорость поперечных волн в верхнем горизонте;

h_0 — глубина залегания контакта слоев.

Отсюда следует, что глубина зондирования определяется четвертью длины поперечной волны (λ):

$$h = \lambda/4 = V_s(f)/4f. \quad (5)$$

Это утверждение можно считать справедливым и для коэффициента усиления горизонтальных компонент микросейсм J_H , поскольку в них преобладают поперечные колебания (волны Лява). В вертикальных же составляющих микросейсм доминирующими являются волны Рэлея со значительной долей продольных колебаний, поэтому глубины зондирования для параметров J_V и J_H отличаются. Некоторые исследователи используют для вертикальных микросейсмических зондирований следующую формулу расчета глубины (Горбатиков, Цуканов, 2011; Яновская, 2017):

$$h = kV_R(f)/f, \quad (6)$$

где k — коэффициент, принимающий значения 0.3–0.5;

V_R — скорость волны Рэлея.

Физический смысл коэффициента k , как и причины его изменения, при этом остаются неясными. Кроме того, сам постулат об искажении спектра микросейсмического поля локальными скоростными неоднородностями выглядит спорным. Более реальным представляется подход о возникновении стоячих волн сжатия-растяжения (Колесников, Федин, 2017) с собственными частотами:

$$f_n = (2n-1)V_p/4h, \quad (7)$$

где n — номер моды стоячих волн ($n = 1, 2, 3, \dots$);
 V_p — скорость продольных волн.

Тогда глубина исследований для основной моды ($n = 1$) продольных колебаний в вертикальной плоскости предстанет в физически значимом виде:

$$h = V_p(f)/4f, \quad (8)$$

то есть глубина зондирования определяется четвертью длины продольной волны. Следует уточнить, что рассматриваемые виды микросейсмических зондирований ориентированы на изучение *динамических* свойств, поэтому в любом случае необходимы дополнительные работы по изучению кинематических характеристик разреза. Скорости распространения сейсмических волн можно определить с помощью малоглубинной сейморазведки методом преломленных волн (МПВ) или дисперсионных методов анализа. При опытно-методических работах скорость поперечных волн можно приблизительно оценить по скорости распространения поверхностных волн Рэлея V_R . Для большинства горных пород, при нормальных значениях коэффициента Пуассона ($\mu = 0.25 \div 0.5$): $V_S \approx 1.07 \pm 0.02 V_R$ (Давыдов, 2019). Чтобы получить ориентировочные значения скорости продольных волн можно использовать характерное для осадочных грунтов соотношение $V_S/V_p \approx 0.55$. Для представления конечных результатов спектральные отношения переводятся из частотной области в диапазон глубин с построением сводных разрезов сейсмических параметров J_p , J_H и H/V . При этом, для привязки по глубине параметров J_H и H/V используется формула (5), а для параметра J_p следует применять формулу (8).

Для точной привязки глубинных микросейсмических разрезов коэффициентов усиления и HVSR необходимо привлекать другие геофизические методы и результаты бурения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Микросейсмические шумы регистрировались в частотном диапазоне 1–1000 Гц с помощью автономной сейсмической станции ОМАР-2с, разработанной в Институте геофизики УрО РАН (ИГФ УрО РАН) на базе универсального

геофизического приемника ОМАР-2 (Давыдов, 2016а). В состав станции входят один вертикальный и два горизонтальных сейсмоприемника фирмы Geospace Corporation, с собственной частотой колебаний 10 Гц. За счет частотно-зависимого усиления сигналов осуществлен подъем амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) измерительных каналов в низкочастотной области, чем достигнута линейность АЧХ общего тракта сеймостанции в расширенном диапазоне частот (1–500 Гц). Методика наблюдений является достаточно отработанной (Давыдов, 2015) и мало отличается от стандартной. На пункте наблюдений станция устанавливалась в горизонтальное положение и ориентировалась по оси плотины. Далее проводился контроль и регулировка уровня записи сигналов по индикаторам, после чего осуществлялась собственно запись микросейсмического шума в течение 3–10 минут. Информация в реальном масштабе времени проходила аналого-цифровое преобразование и сохранялась в памяти цифрового регистратора или ноутбука. По окончании работ полученные записи переписывались в стационарный компьютер, в котором редактировались и обрабатывались с помощью специального пакета программ. Амплитудные спектры и спектральные отношения сигналов вычислялись с помощью быстрого преобразования Фурье.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микросейсмические зондирования проводились на трех грунтовых плотинах Свердловской области: Верхне-Сысертской на р. Сысерть, Мало-Седельниковской на р. Арамилка и Глубооченской на р. Глубокой (рис. 1).

Анализ полученных микросейсмических разрезов осуществлялся путем их сравнения с результатами других геофизических работ и ранее полученными материалами. На представленных примерах рассмотрены основные особенности глубинных разрезов динамических параметров, построенных с использованием спектральных отношений микросейсм.

Плотина Верхне-Сысертского пруда. Плотина в пос. Верхняя Сысерть была возведена в 1849 г. для нужд железоделательного завода. В 1881 г. был проведен капитальный ремонт плотины, придавшей ей современный вид. Ядро плотины состоит из утрамбованной глины, основанием служат скальные грунты метаморфических пород. Протяженность насыпи составляет около 350 метров, ширина по гребню более 15 м, высота достигает 10 м в центральной части. В настоящее время основным назначением плотины является регулирование уровня водохранилища.

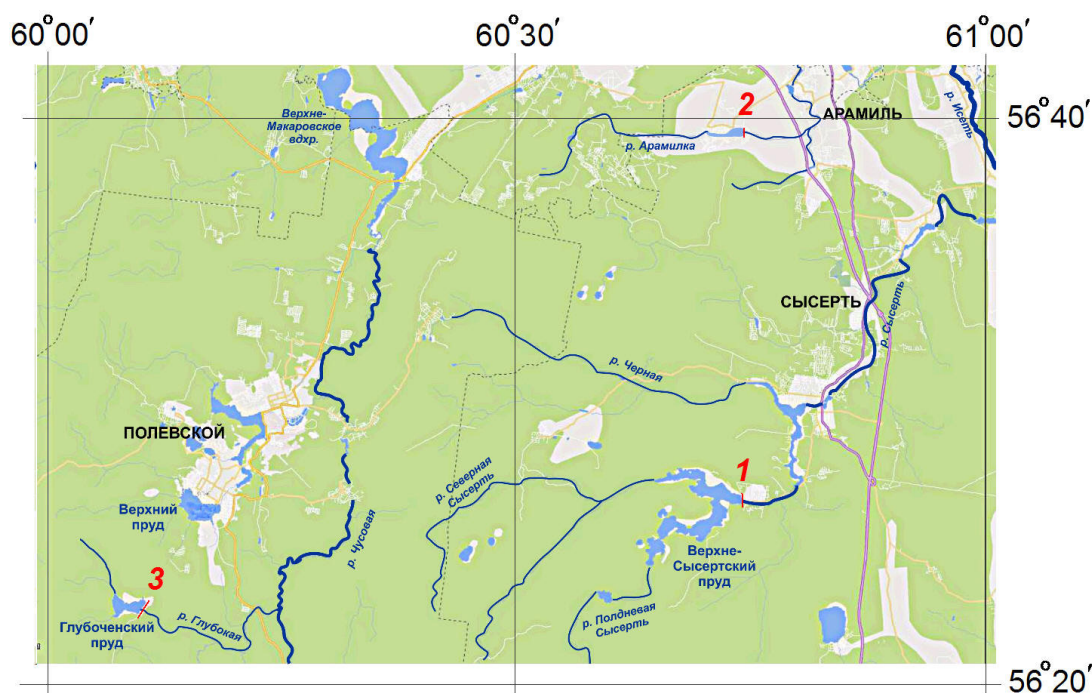


Рис. 1. Обзорное местоположение Верхне-Сысертской (1), Мало-Седельниковской (2) и Глубоченской плотин (3).

Fig. 1. Overview location of Verkhne-Sysert (1), Malo-Sedelnikovskaya (2) and Glubochenskaya dams (3).

При изучении микросейсм КП располагался на южном окончании плотины, где коренные породы, представленные слабо трещиноватыми метаморфическими сланцами, выходят на поверхность. Общий уровень микросейсм здесь характеризуется минимальными значениями, по сравнению с другими пикетами (ПК) наблюдений (рис. 2).

На полученных спектрах можно отметить, что преимущественное повышение амплитуды микросейсм на плотине происходит в диапазоне частот от 3 до 35 Гц. Кроме общего подъема уровня, выделяются отдельные резонансные пики на разных частотах. При этом, характерные пики вертикальных компонент микросейсм обычно более интенсивные, что проявляется и в спектральных отношениях (рис. 3).

Амплитуда спектральных отношений может повышаться в пиковых значениях в 5–10 раз и более того. Максимальный коэффициент усиления ($J_v \approx 40$) отмечен в районе шлюзов, что вероятно связано с резонансом конструкции.

Верхне-Сысертская плотина является одним из полигонов ИГФ УрО РАН для тестирования новых методов, аппаратуры и методических приемов. На ней проведен комплекс геофизических исследований (Davudov et al., 2016; Федорова и др., 2017), включающий вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), дистанционные индукционные зондирования (ДИЗ), электротомографию, сейсморазведку МПВ, многоканальный анализ поверхностных волн и другие методы.

На основании проведенных сейсморазведочных работ были выделены основные структурные горизонты плотины, в которых определены скорости распространения продольных и поперечных волн (V_p , V_s), необходимые для построения микросейсмических разрезов. Основой для сопоставления разрезов послужили границы разделов, построенные по результатам комплексных геофизических исследований.

В составе плотины четко выделяются три основных структурных элемента (сверху-вниз): техногенные грунты отсыпки поверхности, глинистое ядро (тело плотины) и коренные породы основания (рис. 4).

Коренные породы имеют минимальные значения параметров усиления: $J_H = 1-1.5$, $J_v = 1-4$. Глинистое ядро плотины, наоборот, характеризуется максимальными величинами коэффициентов усиления: $J_H = 3-10$, $J_v = 10-25$. Заметим, что контуры ядра, выделенные по вертикальным и горизонтальным микросейсмам, несколько отличаются друг от друга и не вполне совпадают с границами, полученными ранее по комплексу геофизических методов. Первое свидетельствует об анизотропии разреза, а второе — о том, что сейсмическая реакция грунта может быть не связана напрямую с физическими свойствами (электрическими и акустическими) выделенных слоев. Разрез HVSR менее информативен: резонансные границы ($H/V = 3-8$) носят не стабильный и прерывистый характер, что уже отмечалось ранее на других плотинах (Давыдов, 2016б), в то же время

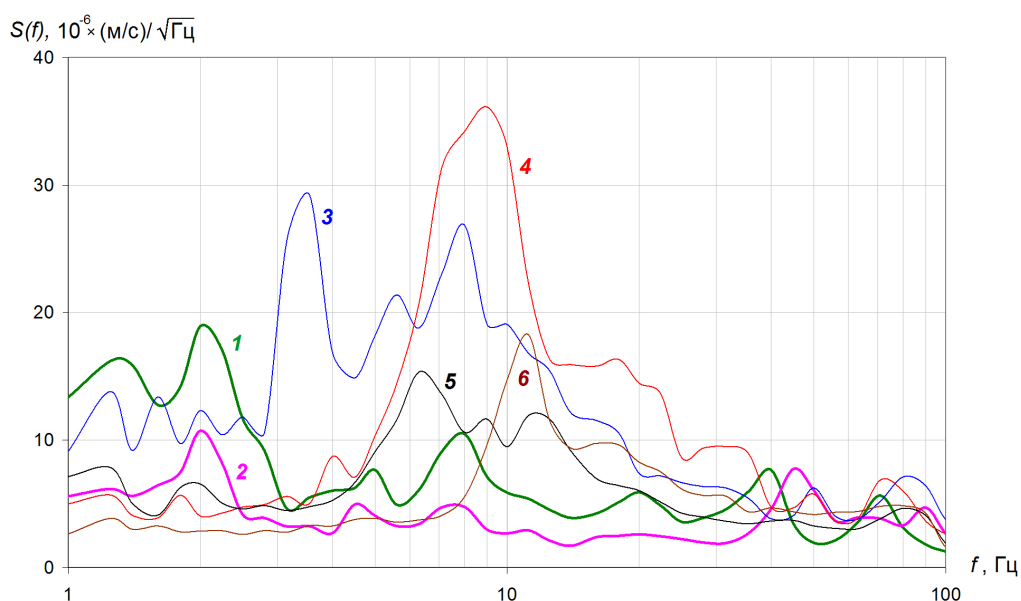


Рис. 2. Спектральный состав микросейсмического шума Верхне-Сысертской плотины на некоторых пунктах наблюдений. Спектры горизонтальных микросейсм (H) на КП (1), ПК12 (3), ПК24 (5), вертикальных (V) — на КП (2), ПК12 (4), ПК24 (6).

Fig. 2. Spectral composition of microseismic noise of the Verkhne-Sysert dam at some observation sites. The spectra of horizontal microseisms (H) on KP (1), PK12 (3), PK24 (5), vertical (V) — on KP (2), PK12 (4), PK24 (6).

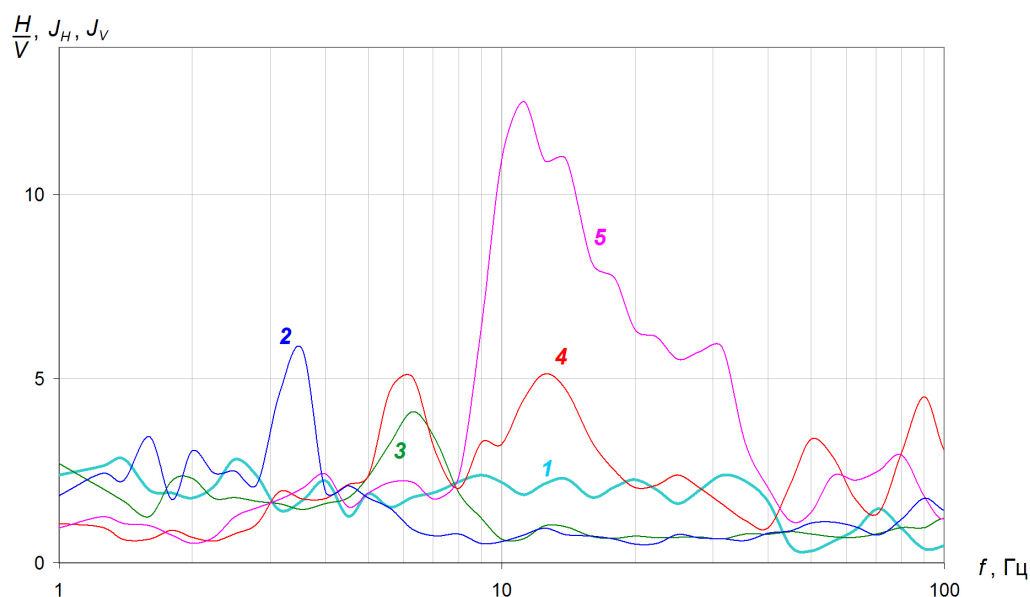


Рис. 3. Спектральные отношения микросейсмических шумов на Верхне-Сысертской плотине. Параметр H/V на КП (1), ПК12 (2), ПК24 (3), параметры J_H (4) и J_V (5) на ПК24.

Fig. 3. Spectral ratios of microseismic noise at the Verkhne-Sysert dam. H/V -ratio on KP (1), PK12 (2), PK24 (3), parameters J_H (4) and J_V (5) on PK24.

субгоризонтальные аномалии H/V -отношений более точно соответствуют кровле коренных пород. Верхняя граница, разделяющая песчано-щебенистую подсыпку от глинистого ядра, на разрезе H/V -отношений не фиксируется, однако уверенно видна на разрезах коэффициентов усиления J_V и J_H . Это дает нам ключ к пониманию того, от какой характеристики среды зависит сейсмическая реакция грунта. Считается, что аномальный резонанс HVSР возникает в районе

контакта двух геологических слоев, более чем в 2.5 раза отличающихся между собой по акустической жесткости. Поскольку данные аномалии на верхней границе отсутствуют, то сильного изменения скорости сейсмических волн и плотности грунтов не происходит. Однако, происходит изменение состава грунтов с песчано-щебенистого на глинистый, а глины, как известно, обладают максимальной пористостью среди осадочных пород. Таким образом, можно прийти

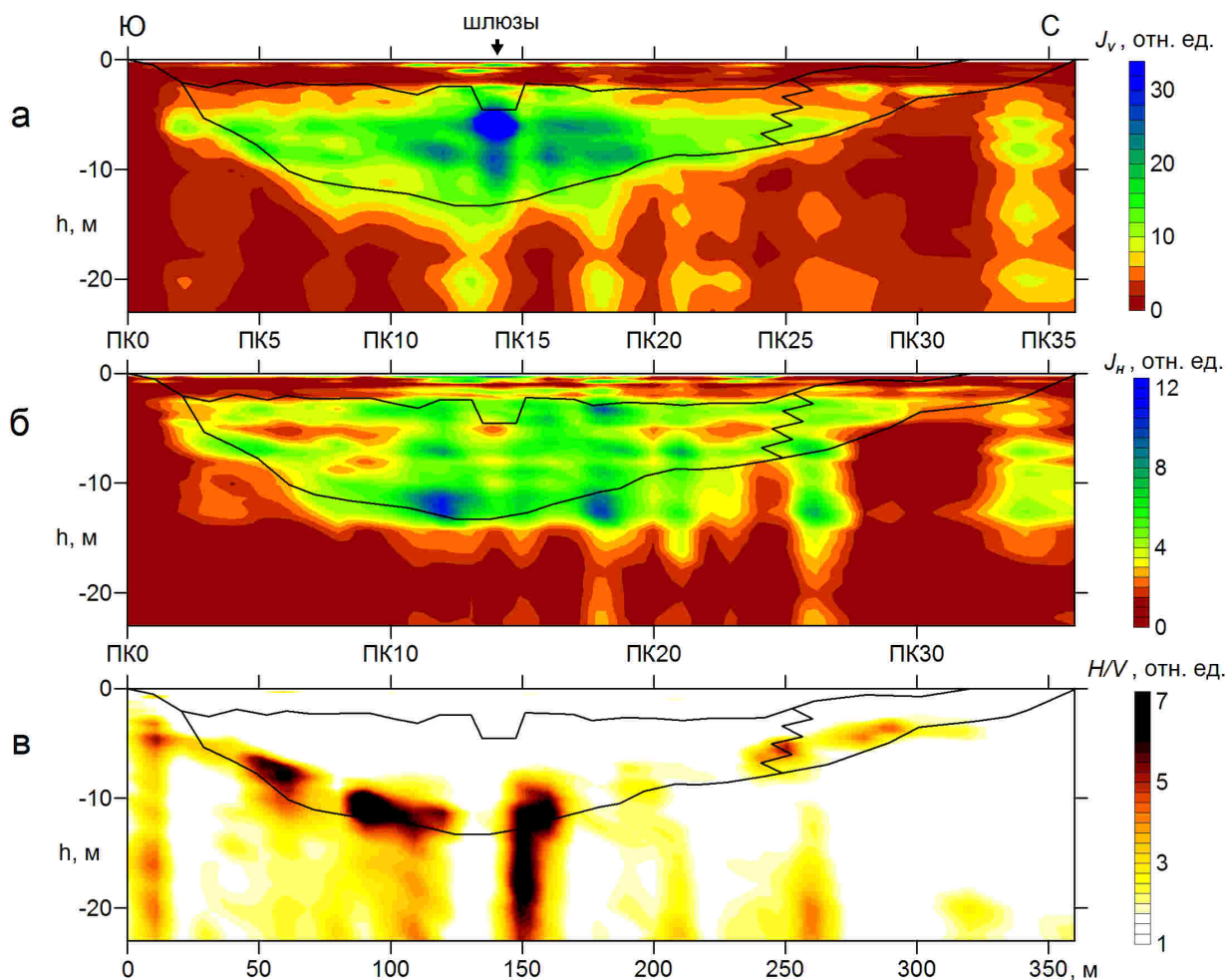


Рис. 4. Результаты микросейсмических зондирований на Верхне-Сысертской плотине: разрез коэффициента усиления вертикальных микросейсм (*а*); разрез коэффициента усиления горизонтальных микросейсм (*б*); разрез H/V -отношений (*в*). Контурными линиями выделены структурно-геологические границы грунтов, полученные по результатам комплексных геофизических исследований. Местоположение разреза приведено на рис. 1 (*г*).

Fig. 4. Results of microseismic sounding at the Verkhne-Sysert dam: section of the amplification coefficient of vertical microseisms (*a*), section of the amplification coefficient of horizontal microseisms (*b*), section of H/V ratios (*v*). Contour lines highlight the structural and geological boundaries of soils obtained from complex geophysical studies. The location of the section is shown in Fig. 1 (*g*).

к предположению, что причиной повышения уровня микросейсмического шума является увеличение пористости грунтов. Подобный эффект усиления амплитуд микросейсм наблюдается в зонах разломов, что также можно объяснить увеличением объема порового пространства в сильно трещиноватых горных породах. Возвращаясь к Верхне-Сысертской плотине, аномалии высоких значений коэффициентов усиления в коренных породах $J_h > 4$ (ПК17–23, ПК26, ПК34) и $J_v > 8$ (ПК13, ПК18, ПК21, ПК34) можно связать с их повышенной трещиноватостью. Присутствие ослабленной зоны сосредоточенной фильтрации в районе пикетов ПК17–ПК23 подтверждается результатами электроразведки и наличием действующего родника, выходящего на поверхность за плотину в районе ПК20. Еще одна аномалия на ПК26 в основании плотины подтверждается

ранее проведенными работами, по результатам которых здесь находится вертикальный контакт пород разного состава. Следует отметить, что, несмотря на более высокие значения усиления вертикальных микросейсм, компоненты горизонтальных колебаний являются более помехоустойчивыми и информативными с точки зрения выделения аномалий.

Плотина в с. Малое Седельниково. Речка Арамилка, являющаяся правым притоком р. Исеть, запружена в селе Малое Седельниково маловысотная плотиной. Длина плотины небольшого пруда чуть больше 120 м, высота в среднем 5–7 м. Основание сложено ультраосновными породами, подвергшимися серпентинизации. Водосливом служит труба большого диаметра в теле плотины. Контрольный пункт располагался в 10 м южнее начала профиля.

Ранее на плотине были выполнены бесконтактные электрические зондирования, а также ВЭЗ и ДИЗ (Давыдов и др., 2019). В результате инверсии выделены границы слоев, отличающиеся между собой по удельным электрическим сопротивлениям (УЭС). Геоэлектрический разрез состоит из трех слоев: суглинисто-щебенистой отсыпки (60–150 Ом·м), глинистого ядра (15–20 Ом·м) и коренных пород основания (от 200 Ом·м и более). Средние значения сейсмических скоростей V_p и V_s , необходимые для построения микросейсмических разрезов, взяты с Ельчовской плотины (Давыдов, Федорова, 2014), как наиболее близкой по времени строительства и использованным материалам. Положение геоэлектрических слоев довольно хорошо совпадают с резонансными границами HVSR (в пределах 5–10 %), предстающими, как и в прошлый раз, в виде прерывистых линейных аномалий (рис. 5б).

Отличие от первого примера, здесь присутствуют резонансные отклики, как на подошве, так и на кровле глинистого ядра. Аномалии H/V -отношений составляют от 2 до 6 отн. ед., что указывает на присутствие в этот раз существенного различия в акустической жесткости слоев. В то же время, верхняя граница по сейсмической реакции грунта не совпадает с выделенной кровлей глин. На разрезах коэффициента горизонтального усиления J_H граница раздела выглядит почти прямолинейной и залегает на глубине более двух метров (рис. 5б). Учитывая уровень воды в пруду и высотные отметки гребня плотины, можно предположить, что верхняя градиентная граница J_H приблизительно соответствует уровню грунтовых вод. Таким образом, сейсмическая реакция грунта зависит не только от общей пористости, но и от количества поровой влаги. Из-за действия гравитации, площадь заполнения пор водой в вертикальной плоскости

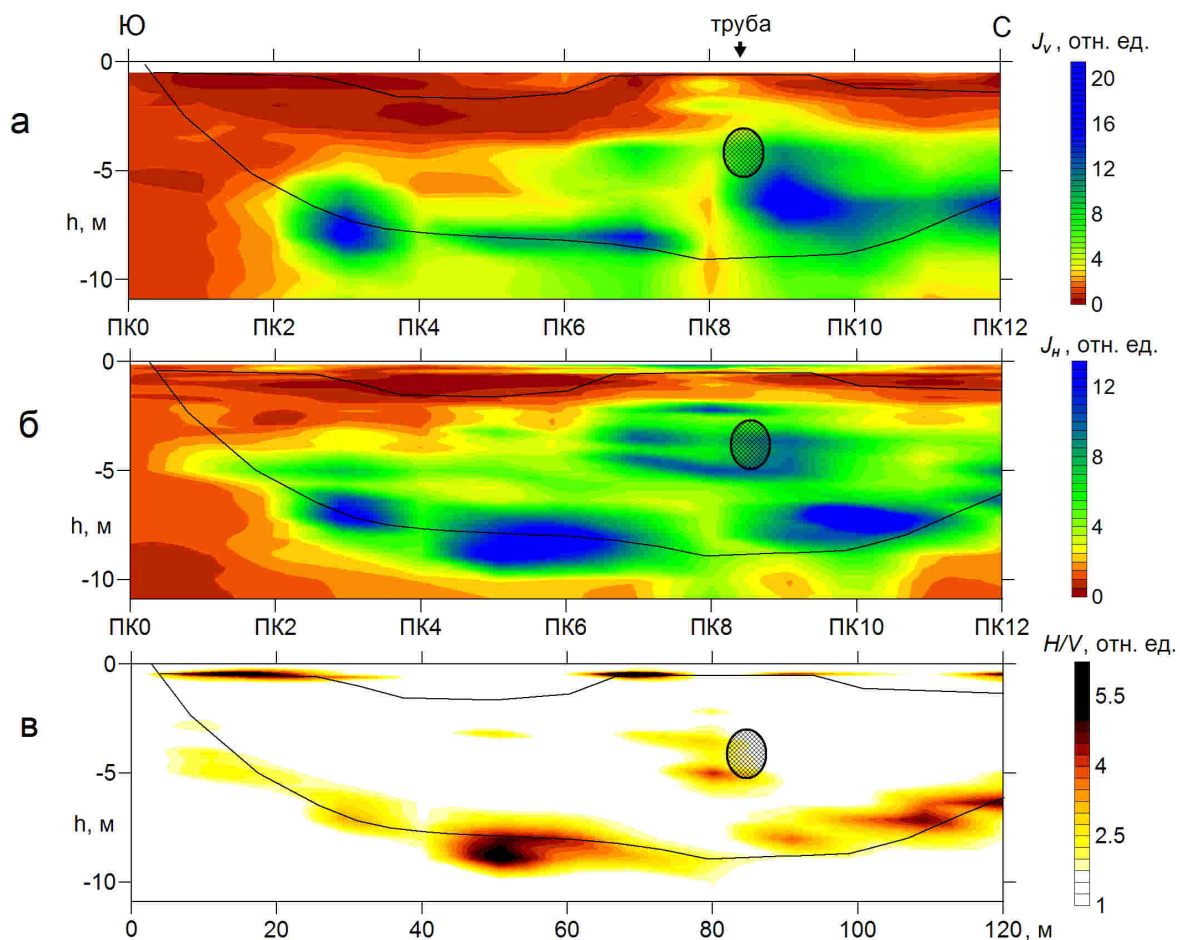


Рис. 5. Результаты микросейсмических зондирований на Мало-Седельниковской плотине: разрез коэффициента усиления вертикальных микросейсм (*а*); разрез коэффициента усиления горизонтальных микросейсм (*б*); разрез H/V -отношений (*в*). Контурными линиями выделены границы насыпных грунтов, полученные по результатам электромагнитных зондирований, заштрихованный овал соответствует положению водосливной трубы. Местоположение разреза приведено на рис. 1 (2).

Fig. 5. Results of microseismic sounding at the Malo-Sedelnikovskaya dam: section of the amplification coefficient of vertical microseisms (*a*), section of the amplification coefficient of horizontal microseisms (*b*), section of H/V ratios (*c*). Contour lines mark the boundaries of bulk soils obtained from electromagnetic sounding, the shaded oval corresponds to the position of the spillway pipe. The location of the section is shown in Fig. 1 (2).

меньше, чем в горизонтальной, поэтому градиентная граница на разрезах спектрального усиления J_v смещается на глубину полного водонасыщения (рис. 5а). Величины коэффициентов усиления для коренных пород и зоны аэрации рыхлых грунтов, как и в предыдущем случае, имеют минимальные значения: $J_H \approx J_v = 0.5-2$. Водонасыщенные глины и трещиноватые серпентиниты кровли основания плотины характеризуются высокими значениями: $J_H = 3-13$, $J_v = 4-20$.

Плотина Глубоченского пруда. Плотина располагается недалеко от г. Полевской, она построена в середине XIX в. на речке Глубокой в месте ее слияния с Каменушкой. Длина насыпной части плотины составляет около 800 метров, ширина у основания 30 м. Глубоченский пруд являлся резервным поставщиком воды в пруд Полевского завода. Вода подавалась по подземному тоннелю и искусственному каналу общей длиной более 5 км. Последняя реконструкция гидротехнических сооружений Глубоченского пруда проводилась в начале 1960-х гг. При возведении плотины были использованы местные глины и суглинки, в основании залегают вулканогенные породы палеозойского возраста, выходящие на поверхность к западу от водосброса.

На объекте проведен ряд геофизических исследований, в т.ч. ДИЗ с измерением частотной дисперсии и электротомография с изучением вызванной поляризации. На основании результатов работ определены основные структурно-геологические элементы плотины, контур которых нанесен на полученные микросейсмические разрезы. Поскольку Полевские и Сысертские заводы в середине XIX века принадлежали одним владельцам (Турчаниновым-Соломирским), то и заводские плотины в это время построены одинаково, из одних материалов. Это дает основание использовать для расчета микросейсмических разрезов плотины Глубоченского пруда (рис. 6) средние значения I_p и I_s , полученные для Верхне-Сысертской плотины.

Электрофизические свойства грунтов обладают высокой контрастностью. Так УЭС насыпной части плотины составляет от 10 до 200 Ом·м, а сопротивления коренных пород превышают 2000 Ом·м. В процессе исследований зафиксирована повышенная влажность грунтов северо-восточной стороны с возникновением путей сосредоточенной фильтрации в интервале пикетов ПК5–ПК25 (Давыдов, Горшков, 2022). Это подтверждается наличием бьющих родников на низовом откосе. Микросейсмические зондирования также фиксируют на этом отрезке аномальные значения коэффициентов усиления в коренных породах: $J_H > 4$ (ПК8–ПК19), $J_v = 6-16$

(ПК8–ПК26), вероятно связанные с их высокой трещиноватостью. В целом, характер поведения динамических параметров грунтов подтверждают закономерности, выявленные на уже приведенных примерах. Например, резонансные границы HVSR также прерывисты, но хорошо совпадают с границей коренных пород. Верхняя граница насыпных грунтов не проявилась на разрезе H/V -отношений, но отчетливо отображается на разрезах J_H и J_v , ровно как и нижняя граница — за счет существенного отличия значений коэффициентов усиления для глинистого ядра ($J_H = 2.5-10$, $J_v = 5-22$) и окружающих пород ($J_H = 1-2$, $J_v = 1-3$). Отдельно стоит отметить, что линия электропередачи (ПК69) вносит существенные помехи на параметры сейсмической реакции грунта и искажает микросейсмические разрезы.

ВЫВОДЫ

Построения глубинных разрезов динамических параметров микросейсмических колебаний, наряду с другими способами контроля, позволяют оценить эксплуатационное состояние гидротехнических сооружений.

В дополнение к ранее применяемым методам, предложены и реализованы построения разрезов коэффициента усиления микросейсмических шумов в горизонтальной плоскости. На приведенных примерах обследования гидротехнических сооружений впервые выполнено сопоставление разрезов трех вариантов микросейсмических зондирований. Отмечено, что глубинные разрезы, полученные на основе различных спектральных отношений микросейсм, имеют свои характерные отличия, связанные с особенностями геологического строения.

В результате проведенных исследований выяснено, что сейсмическая реакция грунтов глинистого ядра плотин существенно отличается от окружающих пород, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. Коэффициенты усиления в коренных породах и дисперсных грунтах зоны аэрации характеризуются минимальными величинами: $J_H = 0.5-2$, $J_v = 1-3$. Для водонасыщенных глин эти значения в 5–10 раз выше: $J_H = 2.5-10$, $J_v = 5-22$. Это может свидетельствовать о том, что основной причиной усиления уровня микросейсмических шумов является увеличение общей пористости и влажности грунтов, а вовсе не наличие локальных скоростных неоднородностей, как утверждают некоторые исследователи.

Коэффициенты усиления вертикальных микросейсм имеют более высокую амплитуду и глубину исследований, однако их аномалии носят размытый характер. Разрезы, построенные

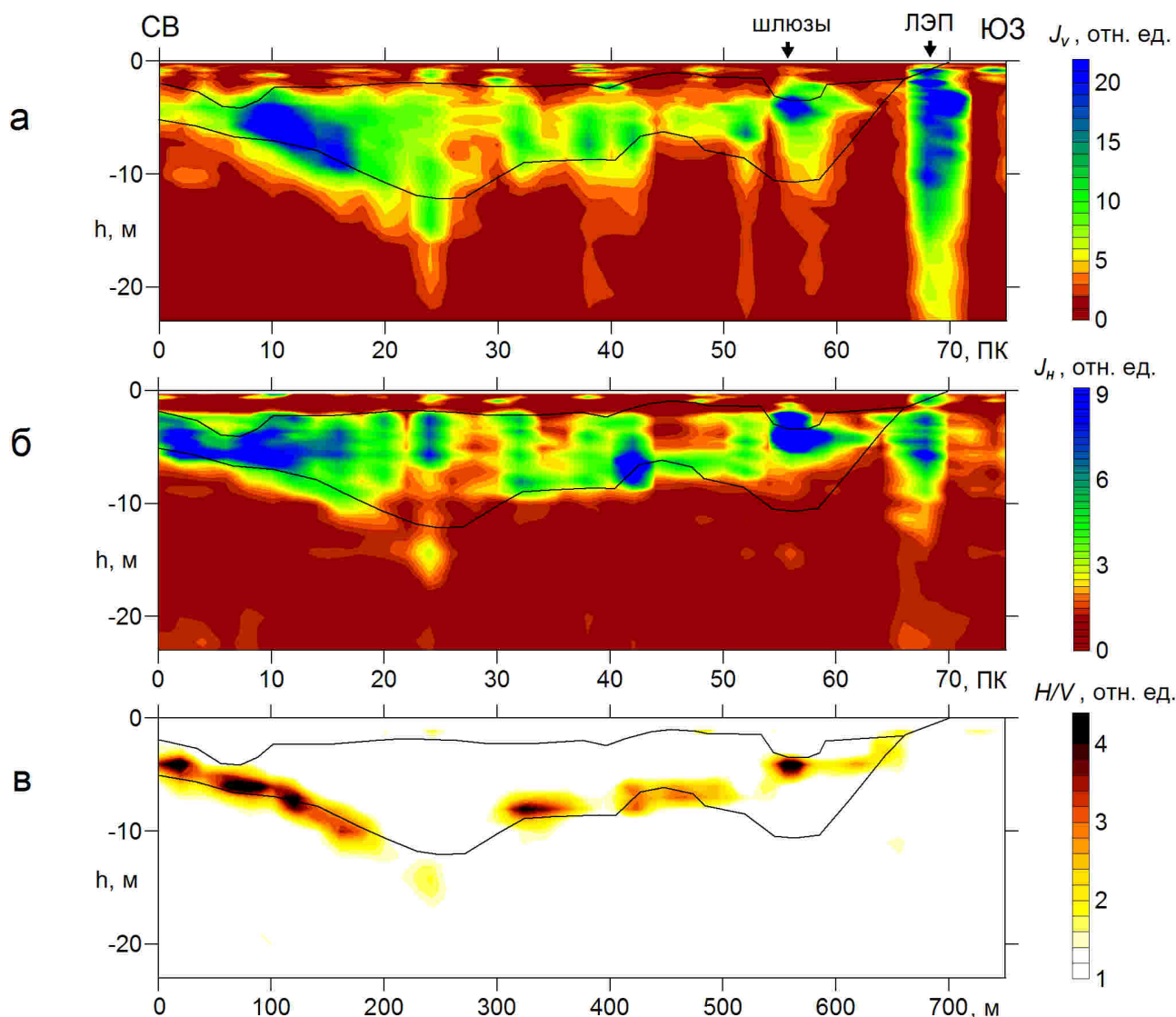


Рис. 6. Результаты микросейсмических зондирований на Глубоченской плотине: разрез коэффициента усиления вертикальных микросейсм (*а*); разрез коэффициента усиления горизонтальных микросейсм (*б*); разрез H/V -отношений (*в*). Контурными линиями выделены границы насыпных грунтов, полученные по результатам электротомографии. Местоположение разреза приведено на рис. 1 (*з*).

Fig. 6. Results of microseismic sounding at the Glubokenskaya dam: section of the amplification coefficient of vertical microseisms (*a*), section of the amplification coefficient of horizontal microseisms (*b*), section of H/V ratios (*c*). Contour lines mark the boundaries of bulk soils obtained from electrotomography. The location of the section is shown in Fig. 1 (*z*).

по компонентам горизонтальных колебаний, имеют лучшую разрешающую способность и большую достоверность при выделении отдельных элементов геологических структур.

Аномалии H/V -отношений связаны в первую очередь с контрастными (по сейсмическим свойствам) границами разделов. Так, подошва насыпных грунтов отбивается аномалиями H/V (от 2 до 8 отн. ед.) с погрешностью 5–10%, однако получаемая поверхность раздела носит не стабильный и прерывистый характер. Эта особенность наблюдается и на естественных геологических разрезах, что не всегда позволяет проследить точные литологические границы.

Использование разрезов всех трех динамических параметров (на основе спектральных отношений микросейсмических шумов) позволяет уверенно выделять основные структурно-геологические элементы строения грунтовых плотин, и выявлять вероятные зоны повышенной фильтрации. Полученный опыт дает основание рекомендовать применение данной технологии при исследованиях разнообразных геологических и инженерных объектов.

К основным преимуществам микросейсмических наблюдений относится мобильность и простота проведения работ. Из недостатков следует упомянуть неоднозначность получаемых

результатов и снижение разрешающей способности в зависимости от глубины. Технологию микросейсмических зондирований следует применять в комплексе с сейсморазведкой и другими геофизическими методами. При интерпретации нужно руководствоваться опытом работ на ближайших аналогах, а для точной привязки потребуются параметрические исследования на контрольных профилях с известным геологическим строением.

Список литературы [References]

- Алешин А.С.* Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: ООО «Светоч Плюс», 2010. 293 с. [*Aleshin A.S.* Seismic microdistricting of especially critical objects. Moscow: LLC «Svetoch Plus», 2010. 293 p. (in Russian)].
- Горбатилов А.В., Цуканов А.А.* Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. 2011. № 4. С. 96–112. <https://doi.org/10.1134/S0002333711040077> [*Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A.* Modeling of Rayleigh waves near the scattering velocity heterogeneities. Research opportunities microseismic sensing method // *Fizika Zemli*. 2011. № 4. P. 96–112 (in Russian)].
- Давыдов В.А.* Спектральный анализ данных микросейсмических зондирований // *Геофизика*. 2015. № 1. С. 72–77 [*Davydov V.A.* The spectral analysis of data of microseismic sounding // *Geofizika*. 2015. № 1. P. 72–77 (in Russian)].
- Давыдов В.А.* Универсальный полевой геофизический приемник ОМАР-2 // *Приборы и техника эксперимента*. 2016а. № 6. С. 127–128 [*Davydov V.A.* Universal field geophysical receiver OMAR-2 // *Instruments and Experimental Techniques*. 2016а. № 6. P. 127–128 (in Russian)].
- Давыдов В.А.* Микросейсмическое зондирование грунтовых плотин на основе изучения ортогональных компонент колебаний // *Инженерные изыскания*. 2016б. № 5–6. С. 46–51 [*Davydov V.A.* Microseismic sounding of soil dams on the basis of analysis orthogonal components of oscillations // *Engineering research*. 2016б. № 5–6. P. 46–51 (in Russian)].
- Давыдов В.А.* Малоглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм. Георесурсы. 2019. Т. 21. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85> [*Davydov V.A.* Shallow seismic sounding based on ellipticity analysis of microtremor // *Georesursy*. 2019. V. 21. № 1. P. 78–85].
- Давыдов В.А., Федорова О.И., Байдилов С.В.* Применение 1D–2D инверсий электромагнитных зондирований при изучении грунтовых плотин // *Известия УГГУ*. 2019. Вып. 2 (54). С. 72–79. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-72-79> [*Davydov V.A., Fedorova O.I., Baidikov S.V.* Application of 1D–2D inversion of electromagnetic sounding in the study of ground water dam // *News of the Ural State Mining University*. 2019. Iss. 2 (54). P. 72–79 (in Russian)].
- Давыдов В.А., Горшков В.Ю.* Дистанционные индукционные зондирования плотин с изучением частотных эффектов // *Гидротехническое строительство*. 2022. № 5. С. 41–49. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.62.39.008> [*Davydov V.A., Gorshkov V.Y.* Remote induction sounding of dams with the study of frequency effects // *Hydraulic engineering construction*. 2022. № 5. P. 41–49 (in Russian)].
- Калинина А.В., Аммосов С.М., Волков В.А.* Сейсмический шум: опыт применения в инженерно-геофизических исследованиях // *Разведка и охрана недр*. 2008. № 1. С. 32–34 [*Kalinina A.V., Ammosov S.M., Volkov V.A.* Seismic noise: experience of application in engineering and geophysical research // *Razvedka i ohrana nedr*. 2008. № 1. P. 32–34 (in Russian)].
- Колесников Ю.И., Федин К.В.* Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: натурный эксперимент // *Технологии сейсморазведки*. 2017. № 3. С. 5–21. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2017-3-5-21> [*Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.* Direct determination of the resonant properties of the upper part of the section by microseisms: a full-scale experiment // *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2017. № 3. P. 5–21 (in Russian)].
- Пупатенко В.В., Рябинкин К.С., Бронников А.К. и др.* Опыт комплексирования микросейсмического и магнитотеллурического зондирования на участке северного фланга Центрального Сихотэ-Алинского разлома // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2021. № 2. Вып. № 50. С. 84–94. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-2-50-84-94> [*Pupatenko V.V., Ryabinkin K.S., Bronnikov A.K. et al.* Experience of integration of microseismic and magnetotelluric sounding on the site of the northern flank of the Central Sikhote-Alin fault // *Vestnik KRAUNts. Nauki o Zemle*. 2021. № 2 (50). P. 84–94 (in Russian)].
- Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. и др.* Глубинное строение северо-западного окончания Кавказа по новым геолого-геофизическим данным // *Физика Земли*. 2020. № 6. С. 48–65. <https://doi.org/10.31857/S0002333720060071> [*Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu. et al.* Deep Structure of the Northwestern Termination of the Caucasus from New Geological and Geophysical Data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. V. 56. № 6. P. 772–788 <https://doi.org/10.1134/S1069351320060075>].
- Табулевич В.Н.* Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука, 1986. 152 с. [*Tabulevich V.N.* Complex studies of microseismic oscillations. Novosibirsk: Nauka, 1986. 152 p. (in Russian)].
- Федорова О.И., Давыдов В.А.* Диагностика грунтовых гидротехнических сооружений электрическими и сейсмическими методами на примере Ельцевской плотины // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2014. № 6. С. 44–55 [*Fedorova O.I., Davydov V.A.* Diagnostics of ground water-work facilities with electric and seismic methods with the Elchevsk dam as a study case // *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. № 6. P. 44–55 (in Russian)].
- Федорова О.И., Давыдов В.А., Байдилов С.В. и др.* Применение геоэлектрического мониторинга при изучении грунтовых плотин // *Геоэкология*.

- Инженерная геология, гидрогеология, гео-криология. 2017. № 1. С. 84–92 [Fedorova O.I., Davydov V.A., Baidikov S.V. et al. Application of geoelectric monitoring in the study of soil dams // Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2017. № 1. P. 84–92 (in Russian)].
- Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2017. №. 6. С. 18–23. <https://doi.org/10.7868/S0002333717060072> [Yanovskaya T.B. On the theory of the microseismic sounding method // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. № 1. P. 819–824. <https://doi.org/10.1134/S1069351317060076>].
- Bath M. Spectral analysis in geophysics. Developments in Solid Earth Geophysics. Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 1974. 579 p.
- Chatelain J.C., Guillier B., Cara F. et al. Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings // Bulletin of Earthquake Engineering. 2008. №. 6. P. 33–74. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9040-7>
- Davydov V.A., Baidikov S.V., Gorshkov V.Y. et al. Geophysics Methods in Electrometric Assessment of Dams // Power Technology and Engineering. 2016. V. 50. № 2. P. 168–175. <https://doi.org/10.1007/s10749-016-0678-7>
- Fäh D., Kind F., Giardini D. A theoretical investigation of average H/V ratios // Geophysical Journal International. 2001. V. 145. № 2. P. 535–549. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01406.x>
- Haghshenas E., Bard P.Y., Theodulidis N. et al. Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio // Bulletin of Earthquake Engineering. 2008. V. 6. P. 75–108. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9058-x>
- Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. V. 30. № 1. P. 25–33.
- Nakamura Y. What is the Nakamura method? // Seismological Research Letters. 2019. V. 90. № 4. P. 1437–1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
- Parolai S., Galiana-Merino J.J. Effect of Transient Seismic Noise on Estimates of H/V Spectral Ratios // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. V. 96. № 1. P. 228–236. <https://doi.org/10.1785/0120050084>

STUDY OF SEISMIC RESPONSE OF SOILS IN MICROSEISMIC SOUNDINGS OF DAMS

V.A. Davydov

*Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 620016;
e-mail: davyde@yandex.ru*

Received December 22, 2022; revised May 16, 2023; accepted June 26, 2023

The basic fundamentals of spectral analysis of horizontal and vertical components of microseismic noise for studying the geological structure of dams are presented. The issues of constructing deep sections of three dynamic parameters of microseisms are considered. The aim of the work is to study the seismic reaction of soils during microseismic sounding of hydraulic structures. The main objectives of the research include the comparison of deep sections of soil reinforcement coefficients with sections of transmission ratios and data from other geophysical methods. As a result of microseismic sounding of three hydraulic structures, it was found out that the seismic reaction of the clay core of dams differs significantly from the surrounding soils. The amplification coefficients in the bedrock and dispersed soils of the aeration zone are characterized by minimal values. For water-saturated clays, these values are 5–10 times higher, which may indicate that the main reason for the increase in the level of microseismic noise is an increase in the overall porosity and moisture of soils. It is noted that the amplification coefficients of horizontal microseisms are more noise-resistant and detailed compared to the parameters of vertical microseisms. It is stated that deep sections of dynamic microseism parameters allow us to confidently distinguish the main elements of the structure of soil dams, as well as to identify probable zones of increased filtration.

Keywords: microseisms, dynamic characteristics, spectral gain, H/V-ratio, dams.