DOI: 10.25698/UGV.2018.4.7.41 УДК 550.34.016

КОМПЛЕКСНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Настоящая статья предлагает познакомиться с некоторыми элементами геофизических проявлений в поле упругих колебаний, данные о которых получены в результате комплексных сейсмических исследований в зоне тектонического контакта гранитов Верх-исетского массива и габбро в районе лесного парка юго-западной части г. Екатеринбурга. Исследования включали в себя малоглубинную сейсморазведку методом преломленных волн (МПВ), пассивные наблюдения микросейсмических колебаний, построение 2D и 3D скоростных и глубинных разрезов, анализ спектральных характеристик регистрируемых сейсмических сигналов. Значительные морфоструктурные неоднородности, полученные на 2D и 3D разрезах участка исследований скорее всего указывают на наличие переходной зоны вблизи тектонического контакта, а рассчитанные значения индекса уязвимости по спектральным соотношениям HVSR характеризуют юго-восточную часть грунтов участка, как максимально восприимчивую к поперечным колебаниям.

Комплексные сейсмические исследования; скоростной разрез; метод спектральных отношений; спектральный анализ; индекс уязвимости.

COMPLEX SEISMIC INVESTIGATIONS BY UPPER PART OF GEOLOGICAL SECTION

Senin L.N., Senina T.E., Voskresenskiy M.N., Parygin G.I. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. This article acquaint with the some characters of geophysical demonstrations in the field by elastic variation. Information about this characters acquired as a result of complex seismic investigations in zone tectonic contact by granites and gabbro in south-west Yekaterinburg city. Investigations includes seismic exploring by method refracted wave, registration by microseismic vibration, calculation 2D and 3D sections of velocity, seismic signals spectrum analysis. The gray area close by tectonic contact be developed on the great heterogeneity morphology and structure on the 2D and 3D sections of velocity. And vulnerability index by spectral function HVSR determine south-west part by area of exploration who open to injury for transverse vibrations.

Complex seismic investigations; sections of velocity; method attitude of spectrum; spectrum analysis; vulnerability index.

Введение

В последнее время уделяется большое внимание при изучении верхней части геологического разреза (ВЧР) сейсмическим методам, косвенно или напрямую связанным с резонансными явлениями (Nakamura, 1989; Nikulins, 2017; Nakamura, 2008). Вместе с тем, классические методы в сейсмике, такие как метод преломленных волн (МПВ), метод отраженных волн (МОВ) и сегодня являются наиболее информативными. Было бы неверно, опираясь на данные, полученные с помощью какой-то одной методики, делать полномасштабные выводы о строении или даже составе изучаемого геологического объекта. Поэтому наибольший эффект при сейсмических исследованиях чрезвычайно сложной верхней части геологического разреза можно получить при комплексировании классических методов и современных разработок, в основе которых лежат спектральные способы изучения верхней толщи геологического разреза.

Настоящая статья предлагает познакомиться с некоторыми элементами геофизических проявлений в сейсмических полях, полученных в результате комплексных сейсмических исследований в зоне тектонического контакта гранитов Верх-исетского массива и габбро в районе лесного парка юго-западной части г. Екате-

Рис. 1. Фрагмент схемы геологического строения территории Екатеринбурга (юго-западный район города)

ринбурга. Собственно контакт и его переходная зона перекрыты слоем элювиально-делювиальных суглинков мощностью до 10 метров. В морфологии рыхлых отложений зона контакта не имеет видимых проявлений. Вблизи контакта, по большей части в комплексе гранитов, находится Свердловское месторождение россыпного золота, приуроченное к кварцевым жилам (Сазонов и др., 1997). Месторождение практически полностью выбрано в предвоенные годы, главным образом шурфовым способом. Оно относится к металлогенической зоне гранитоидной Верхотурско-Верхисетской формации (Pz_3) (Геология СССР, 1973). Граница контакта гранитоидов и габбро простирается в направлении юго-восток – северо-запад.

Основная цель работы – изучение проявлений переходной зоны отмеченного контакта в сейсмических волновых полях разной природы, вызванных упругими воздействиями естественного и искусственного происхождения.

Объект исследований

На рис. 1 показан фрагмент схемы геологического строения территории Екатеринбурга, составленной с использованием данных Б.И. Кузнецова (1964), Г.Н. Кузовкова, Д.А. Двоеглазова, Д.С. Вагшаля (1987) (Тагильцев и др., 2009, рис. 2). Белым прямоугольником на рисунке выделен участок проведения исследований. Граница контакта между массивами гранитов и габбро, пересекающая участок, параллельна объездной автодороге ЕКАД и находится приблизительно в 120 м от нее в юго-западном направлении.

Более детально участок исследований демонстрируется на рис. 2. Здесь на изображение спутникового фото с учетом мас-

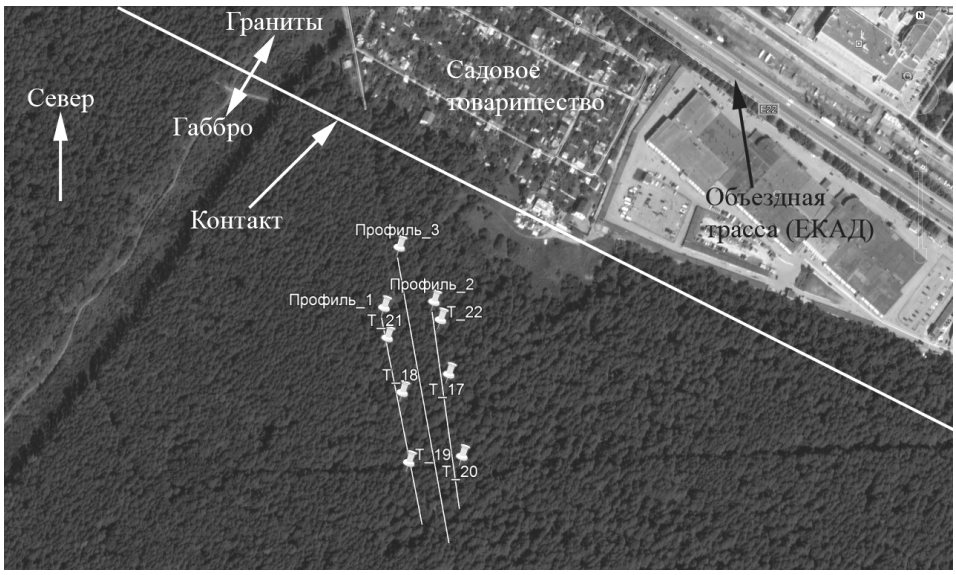

Рис. 2. Участок сейсмических исследований в формате Google Earth

штаба геологической схемы (см. рис. 1) вынесена зона контакта гранитоиды–габбро, а также профильные линии МПВ (Профиль_1–Профиль_3) и точки пассивных сейсмических наблюдений (Т_17–Т_22). Также на рисунке показано садовое товарищество, расположенное вблизи участка исследований, и фрагмент екатеринбургской автодороги ЕКАД.

Профили МПВ и точки пассивных наблюдений смещены на юг по отношению к зоне контакта. Это вызвано, прежде всего, близостью городской автомобильной трассы ЕКАД, создающей интенсивные микросейсмические шумы антропогенной природы, а также близостью садового товарищества, являющегося источником аналогичных помех при любых сейсмических исследованиях.

Несмотря на то, что профили и точки наблюдения не пересекают линию контакта, авторы исследований исходили из следующего положения. Зона контакта массивов гранитов и габбро не может представлять из себя некую тонкую линию, строго разделяющую породы с разными физическими свойствами. Скорее всего, контакт представлен переходной зоной, отражающейся в физических полях разной природы, в том числе и в поле упругих колебаний. Собственно изучение изменений в сейсмических полях разной природы при переходе профильных линий МПВ и точек наблюдения из массива габбро в переходную зону контакта и есть предмет настоящих исследований.

Аппаратура и методика исследований сейсморазведкой МПВ

Полевые работы выполнялись по методике невзрывной малоглубинной сейсморазведки МПВ с использованием системы прямых, встречных и нагоняющих годографов (Палагин и др., 1989). Были отработаны три профиля общей длиной 192 м. Регистрировались сейсмические волны различных типов, но, в соответствии с методикой МПВ (Шерифф, Гелдарт, 1987), в процессе обработки и интерпретации сейсмических данных использовались только волны *P* типа. Шаг между пунктами приема составлял 2 м, между пунктами возбуждения – 12 м. Система наблюдений 5-ти шотовая. Применялся механический источник импульсного типа (кувалда массой 8 кг). Основанием служила металлическая подложка. Число ударов (синхронных накоплений) на одном пункте возбуждения 2–10, в зависимости от зашумленности точки наблюдения.

Запись сейсмических колебаний при всех видах наблюдений осуществлялась с помощью 24-канальной цифровой сейсморазведочной станции «Синус» (Сенин, Сенина, 2005), разработанной и изготовленной в лаборатории сейсмометрии ИГФ УрО РАН. Шаг дискретизации при измерениях составлял 0,5 мс, длина записи 512 дискрет/канал, частота среза фильтра низкой частоты (ФНЧ) 500 Гц, фильтра высокой частоты (ФВЧ) 1 Гц, поканальное усиление изменялось от 0 до 48 дБ с шагом 12 дБ, в зависимости от условий приема.

Аппаратура и методика микросейсмических исследований

Экспериментальные исследования микросейсмических шумов имеют почти вековую историю (Голицын, 2001). Изучаемыми параметрами этих волновых процессов, главным образом, являются амплитудно-частотные характеристики, соотношение амплитуд на различных частотах, а также изменения этих параметров во времени. При этом решаются два класса задач: связь параметров микросейсмического излучения с параметрами возможных первичных источников излучения упругой энергии и связь параметров сейсмических шумов со структурой, литологией и свойствами геологической среды (Надежка и др., 2003).

По первому классу задач следует отметить, что источники микросейсмического излучения делятся на эндогенные (глубинные) и экзогенные (поверхностные). Вторые, в свою очередь, подразделяются на природные и антропогенные. Каждый тип источников порождает свой тип микросейсм, существенно отличающихся по амплитудно-частотным характеристикам.

Ко второму классу относятся задачи определения по параметрам микросейсмического излучения мощности и свойств осадочного чехла, литологического расчленения верхней части разреза земной коры, выделения аномальных зон и связь этих зон с тектоническим строением.

При выполнении работ по изучению микросейсмических шумов на участке исследований применялся 3-канальный регистратор сейсмических сигналов «Регистр» (Сенин и др., 2017), так же как и аппаратура «Синус», разработанный и изготовленный в лаборатории сейсмометрии института геофизики УрО РАН. Совместно с регистратором использовался 3-компонентный велосиметр электродинамического типа СК–1П (Сейсмоприемник низкочастотный … , 1977). Методически работы выполнялись следующим образом. Регистратор с подключенным к нему велосиметром устанавливался в точке наблюдения, после чего аппаратура включалась. Регистрация трех компонент (*X*, *Y* и *Z*) сейсмического сигнала продолжалась в течение 15–20 минут со следующими параметрами записи: полоса регистрируемых частот 1–64 Гц, усиление 32. По окончании записи сейсмоприемник и регистратор перемещались на новые пункты наблюдения, в соответствии со схемой, показанной на рис. 2. Осуществлялась запись новой информации и так далее. Все данные сохранялись на встроенном флэш-диске регистратора. По окончании полевых работ информация считывалась с диска с целью дальнейшей камеральной обработки.

Обработка сейсмических материалов. Результаты и обсуждение

Сейсморазведка МПВ

Реализованная при полевых работах система наблюдений МПВ позволила осуществить обработку и интерпретацию особенностей распространения преломленных волн по прямым, нагоняющим и встречным годографам (Шерифф, Гелдарт, 1987).

При обработке и интерпретации сейсмограмм применялись пакеты программ: «Sin24M» разработки лаборатории сейсмометрии ИГф УрО РАН (Сенина, Воскресенский, 2016) и «WinSism 9.0» (Seismic Refraction … , 2003) шведской компании «GeoSoft». Первичная обработка, в том числе масштабирование, фильтрация, инверсия, снятие годографов, проводилась в пакете «Sin24M». В качестве входной информации для «WinSism» использовались прослеженные годографы первых вступлений. На выходе получали скоростную и глубинную модель. В пакете «WinSism» имеется возможность выбора алгоритма решения обратной кинематической задачи из следующих способов: «Intercept Time Method», «Critical Distance Method», «Delay Method». Основываясь на опыте работ с данным пакетом при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях, был выбран последний из предлагаемых алгоритмов.

На рис. 3 представлены полученные после обработки головных преломленных волн *P* типа скоростные разрезы вдоль профильных линий 1, 3 и 2.

На представленных разрезах хорошо прослеживаются морфоструктурные неоднородности в поле скоростей *P* волн. Очевидно, что изолинии скоростей 2000 и более метров в секунду, соответствующие глубине погружения 10 м и глубже, характеризуют кровлю коренных пород, в нашем случае массив габбро, скорее всего в трещиноватом, сильно выветрелом состоянии. Более наглядно неоднородности в морфологии скоростной границы 2000 м/с представлены на рис. 4, демонстрирующем 3D модель участка исследований, построенную на основе скоростных разрезов вдоль профилей 1, 3 и 2.

Микросейсмические колебания

В области изучения микросейсм одним из наиболее перспективных, по нашему мнению, сегодня является метод горизонтального и вертикального спектральных отношений (HVSR – Horizontal to Vertical Spectral Ratio) как аналог квазипереходной функции. Метод был предложен Ногоши и Игараши в 1971 г. (Nogoshi, Igarashi,1971) и значительно усовершенствован благодаря исследованиям Я. Накамуры (Nakamura, 1989). В основе метода лежат представления о том, что влияние «тонкого слоя»,

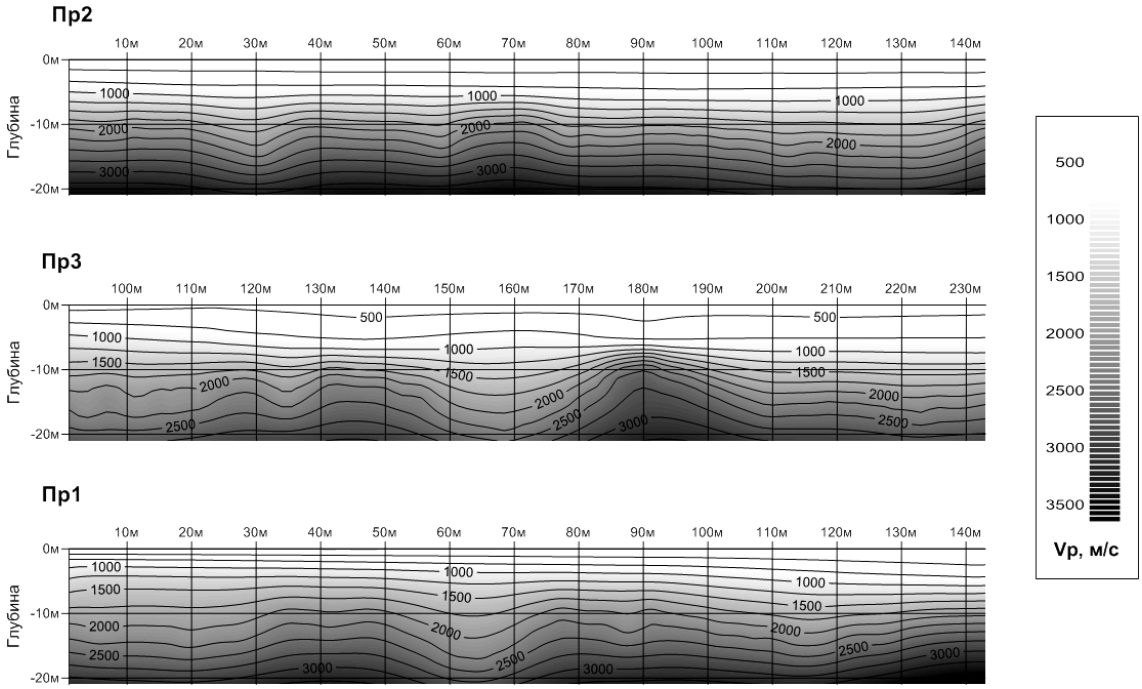

Рис. 3. Скоростные разрезы вдоль профилей 1, 3 и 2

расположенного непосредственно под сейсмическим датчиком на изучаемом объекте, в большей степени способствует усилению поперечной волны (*S*) и практически не изменяет продольную волну (*P*). Исходя из этого положения, отношение спектральных характеристик горизонтальных компонент (*X* и *Y*) к спектру вертикальной компоненты (*Z*) будет характеризовать так называемую передаточную функцию, зависящую от «тонкого слоя» изучаемого объекта. Горизонтальная компонента *H* при этом определяется как среднее квадратичное спектров компонент *X* и *Y*, а вертикальная *V* соответствует спектру компоненты *Z*.

$$H(f) = \frac{\sqrt{X(f)^2 + Y(f)^2}}{2}, \qquad (1)$$

тогда

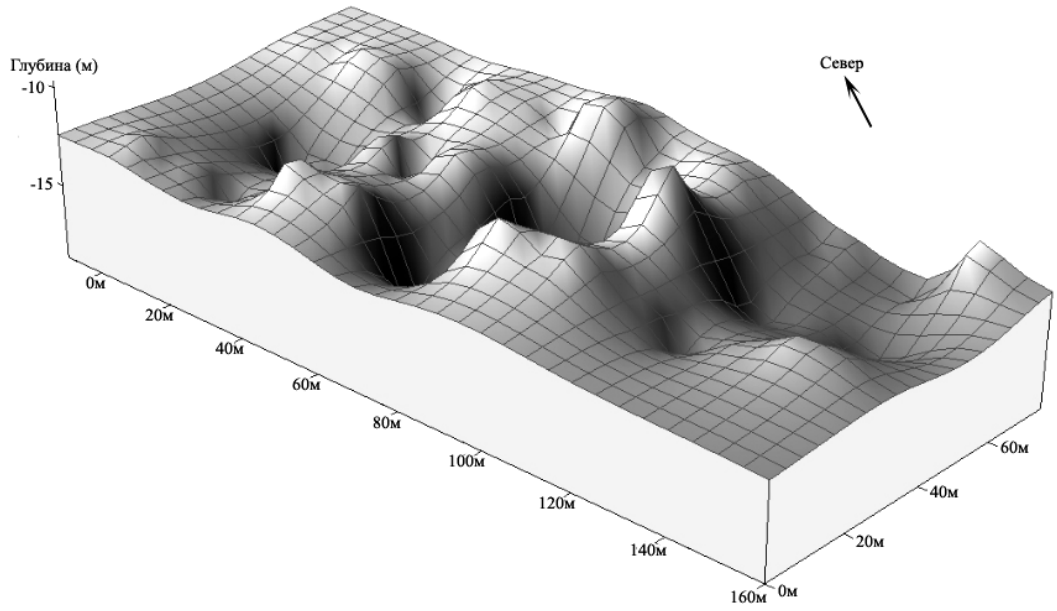

Рис. 4. Скоростная граница 2000 м/с участка исследований

$$\frac{H}{V} = \frac{H(f)}{V(f)}. \qquad (2)$$

Метод может быть применен для решения задач инженерной сейсмологии, например, для оценки динамических свойств грунтов (Nakamura, 1997). Кроме того, его можно использовать в сейсмическом микрорайонировании для определения преобладающих частот грунтов (Zaharia et al., 2008). Преимуществами метода HVSR являются его эффективность, экономическая целесообразность и, главное, возможность применения как в сейсмичных, так и в асейсмичных регионах (Nakamura, 2008). В качестве исходных данных могут использоваться не только землетрясения, но и окружающий сейсмический шум, который состоит из микросейсмических шумов естественного и антропогенного происхождения.

Известно, что микросейсмические колебания представляют собой «случайный процесс, стационарный во времени и пространстве» (Сейсмическое микрорайонирование, 1977). Тогда можно утверждать, что каждая сейсмограмма достаточно большой продолжительности может быть заменена множеством коротких фрагментов такой же суммарной продолжительности. Практическая реализация отмеченного положения заключалась в установке стандартной длительности каждого фрагмента 1024 выборки, что составило порядка 8 секунд на сейсмограмме. Каждый фрагмент был проанализирован на интенсивность шумов, после чего были выбраны фрагменты с наименьшим уровнем шумов близких к импульсным помехам. Таким образом минимизировался непродуктивный импульсный шум. Для каждого «чистого» фрагмента рассчитывались спектральные отношения HVSR, после чего определялись средние значения спектральной функции всех фрагментов для каждой сейсмограммы. На рис. 5 показаны графики функций HVSR для каждой точки наблюдения T_17–T_22 площадки исследований (см. рис. 2).

Полученные в результате полевых наблюдений экспериментальные данные анализировались с использованием известных методик (Peterson, 1993), которые позволя-

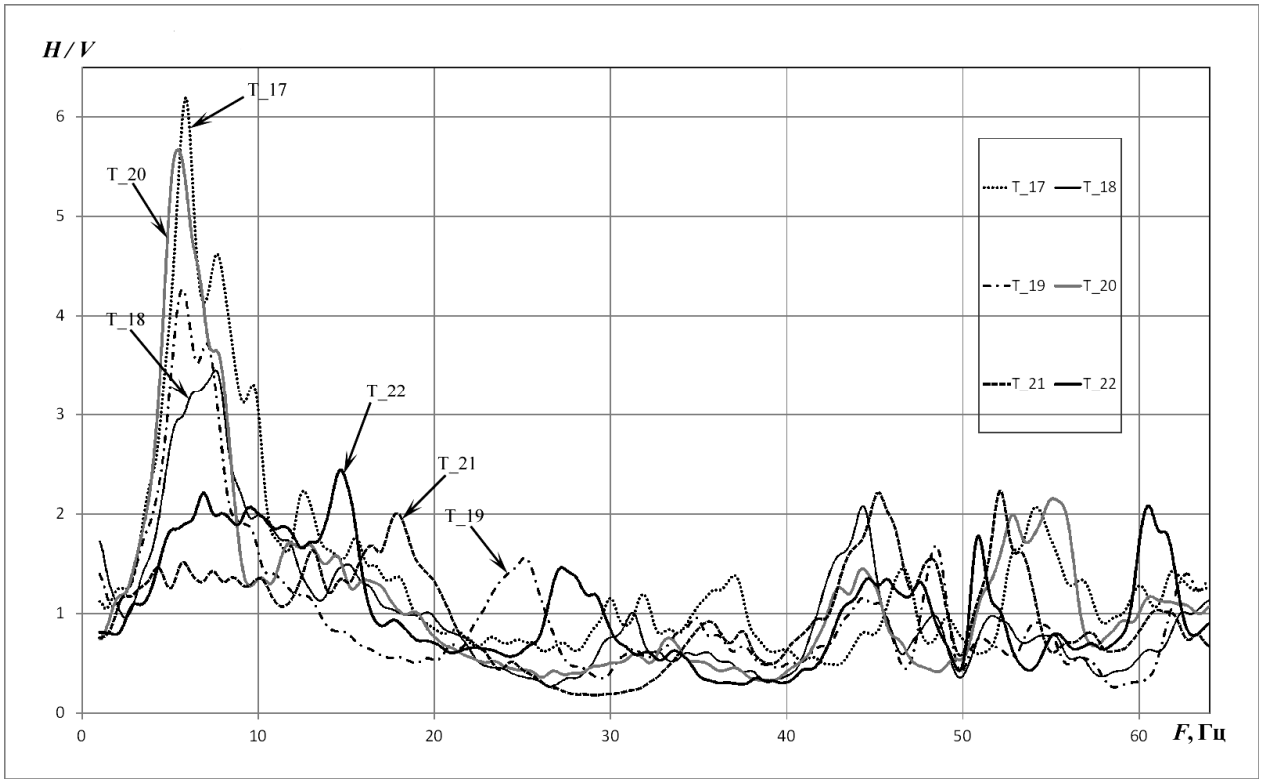

Рис. 5. Спектральные отношения HVSR для каждой точки наблюдения площади исследований во всем диапазоне частот регистрации микросейсмических сигналов

ют охарактеризовать микросейсмические колебания как природного, так и антропогенного характера. Несмотря на то, что в процессе обработки первичных сейсмограмм выбирались фрагменты с минимумом интенсивных шумов, частично антропогенная составляющая все же присутствует в спектрах HVSR, поскольку на полученных спектральных кривых установлены максимумы колебаний в полосе частот 4–20 Гц, которые, скорее всего, связаны с источниками регионального характера (карьерные взрывы, движение тяжелых железнодорожных составов, наиболее интенсивные городские шумы).

В 1997 г. Накамура ввел понятие индекса (коэффициента) уязвимости $K_у$ (Nakamura, 1997). Этот параметр характеризует самые слабые участки исследуемых грунтов. Имеющиеся спектральные графики усиления сотрясений на доминирующих частотах позволили вычислить значения коэффициентов уязвимости, приведенные в таблице для каждой точки измерения по формуле:

$$K_у = \frac{a^2}{F}, \qquad (3)$$

где a – максимальное значение коэффициента усиления в соответствии со спектральной кривой HVSR; F – соответствующая этому значению частота.

Данные, сведенные в таблицу, позволили построить схематическую карту индексов уязвимости грунтов на исследуемой площади (рис. 6).

Заключение

Анализируя спектральные графики HVSR, приведенные на рис. 6, можно сделать некоторые выводы. Точки T_17, T_19, T_20 имеют острые пики резонансных частот, близких друг к другу 5,5–5,9 Гц, что вероятно связано с антропогенным микросейсмическим шумом. Максимальные горизонтальные смещения грунтов в точке T_18 также происходят на частоте 5,7 Гц, что лежит в отмеченном диапазоне частот. Однако пологая вершина этой спектральной кривой с неявным экстремумом, скорее всего, связана с микросейсмическими колебаниями природного характера. Пиковые значения усилений HVSR в точках T_21 и T_22, близкие к величине 2, смещены в более высокочастотную область 14–18 Гц. Таким образом, на исследуемой площадке максимумы поперечных смещений грунтов с усилениями от 2 до 6,4 размещаются в частотном диапазоне 4–20 Гц. При этом, наиболее уязвимыми к горизонтальным упругим воздействиям относятся грунты, расположенные в юго-восточной части участка, что подтверждается расчетами индексов уязвимости, представленных на схематической карте (см. рис. 6).

Возвращаясь к рис. 5, на котором изображена скоростная граница 2000 м/с, расположенная в диапазоне глубин залегания 10–15 м, можно полагать, что она определяет выветрелую кровлю массива коренных пород габбро. При этом наблюдаются отдельные морфоструктурные неоднородности с амплитудой до 5 м. Скорее всего, это связано с двумя основными факторами. Во-первых, кровля коренных пород как правило подвержена наиболее сильному воздействию физико-химических факторов, характеризующих интенсивное выветривание, во-вторых, участок исследований расположен вблизи тектонического контакта, а именно в переходной зоне, что подтверждается исследованиями, представленными в работе (Давыдов и др., 2018).

Работа выполнена при частичной поддержке проекта фундаментальных иссле-

Таблица 1. Коэффициенты уязвимости в точках наблюдения

	Номер точки					
	T_17	T_18	T_19	T_20	T_21	T_22
F (Гц)	5,9	5,7	5,7	5,5	17,9	14,7
$K_у$	6,5	1,6	3,2	5,8	0,2	0,4

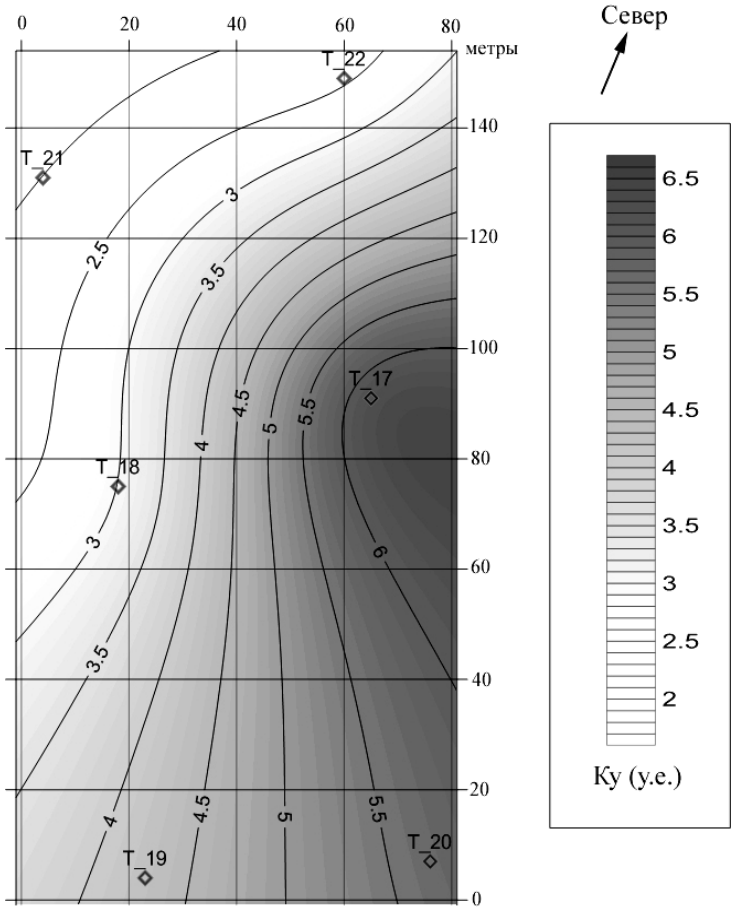

Рис. 6. Схематическая карта индексов уязвимости грунтов площадки исследований

дований № 18-5-5-38 комплексной программы УрО РАН.

Литература

Геология СССР. Том XII. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Полезные ископаемые / Под ред. К.К. Золоева. М.: Недра, 1973. 632 с.

Голицын Борис Борисович, 2001. [Электронный ресурс]. URL: http://www.hrono.ru/biograf /bio_g/golicyn_bb.html (дата обращения 05.12.2018).

Давыдов В.А., Байдиков С.В., Горшков В.Ю., Маликов А.В., Федорова О.И., Астафьев П.Ф. Результаты комплексных геофизических исследований на полигоне месторождения «Свердловское» // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 112–118.

Надежка Л.И., Орлов Р.А., Пивоваров С.П., Сафронич И.Н., Ефременко М.А. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями Воронежского кристаллического массива// Вестник Воронежского ун-та. Геология. 2003. № 2. С. 179–185.

Палагин В.В., Попов А.Я., Дик П.И. Сейсморазведка малых глубин. М.: Наука, 1989. 210 с.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Суставов С.Г., Григорьев В.В. Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона. Екатеринбург: УГГА, 1997. 225 с.

Сейсмическое микрорайонирование / Под ред. д.т.н. С.В. Медведева. М.: Наука, 1977. 248 с.

Сейсмоприемник низкочастотный трехкомпонентный СК-1П. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Алма-Ата: НПО Геофизика. Завод Казгеофизприбор, 1977. 12 с.

Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Накопительная сейсмическая станция с цифровой коррекцией смещения нуля. Патент RU 2248592 C1. Опубл. Бюл. №8, 20.05.2005 г.

Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н. Аппаратно-программный комплекс «Регистр-SD» для изучения сейсмодинамических характеристик объектов, находчщихся под воздействием упругих колебаний // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 157–158.

Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н. Программа обработки сейсмической информации Reg3MSD // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618341 от 27 июля 2016 г.

Тагильцев С.Н., Осипова А.Ю., Лукьянов А.Е. Анализ ориентировки осей главных напряжений в геологической среде г. Екатеринбурга, 2009. [Электронный ресурс]. URL: http://www.geomaster.ucoz.ru/index/karta_kuznecova/0-39 (дата обращения 05.12.2018).

Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Том 2. Обработка и интерпретация данных / Под ред. д.ф.-м.н., проф. А.В. Калинина. М.: Мир, 1987. 400 с.

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. On the H/V Spectrum // The 14-th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China, 2008. P. 1–10.

Nakamura Y. Seismic Vulnerability indices for ground and structures using microtremor // World Congress on Railway Research. Florence, 1997. P. 1–7.

Nikulins Valerijs. Seismic properties of soil in the Eastern Baltic See Region based on the horizontal to vertical spectral ratio method // Estonian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 66. № 2. P. 109–117.

Nogoshi M. & Igarashi T. On the amplitude characteristics of microtremor // Journal of the Seismological Society of Japan. 1971. Part 2. № 24. P. 26–40 (in Japanese with English abstract).

Peterson J. Observation and Modelling of seismic background noise. USGS. Open-File Report 93-322. Albuquerque, New Mexico, 1993. 95 p.

Seismic Refraction Processing Software for Windows. Instruction manual. W_GeoSoft, Geological and Geophysical Software, 06.2003.

Zaharia B., Radulian M., Popa M., Grecu B., Bala A., Tataru D. Estimation of the local response using the Nakamura method for the Bucharest area // Romanian Report in Physics. 2008. Vol. 60. P. 131–144.