

УДК 550.348.436; 551.24

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И РАЗМЕРЫ АКТИВНЫХ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ БЛОКОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА УЧАСТКЕ КУРКИЕКИ (СЕВЕРНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)

© 2019 г. В.Г. Спунгин¹, В.А. Шеков², А.А. Иванов², А.А. Лебедев²

¹ *Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт геологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Россия*

Авторами на участке Куркиеки (Северное Приладожье) проведены наблюдения микросейсмических колебаний на обнажениях массива горных пород, сложенного палеопротерозойскими гнейсами. Целью исследований было изучение структурного строения и напряженного состояния массива, в частности, определение размеров структурно-тектонических блоков горных пород, которые в настоящее время подвергаются минимальным латеральным напряжениям.

В работе использованы результаты спектрального анализа микроколебаний, позволяющие по частоте аномалий спектра определить размеры активных в настоящее время блоков. Представляется, что наиболее активные (подвижные на современном этапе геологической истории) блоки являются и наиболее разгруженными от внешних напряжений.

В разных частях исследуемого массива установлена идентичность спектров фоновых микроколебаний, что свидетельствует о подобии размеров активных структурно-тектонических блоков в пределах массива и однородности его блокового строения. По частоте аномалий спектра определены размеры активных блоков, слагающих исследуемый участок, и установлен размер блока, отличающегося наибольшей современной активностью и, соответственно, меньшей по сравнению с другими блоками “стесненностью”.

Сопоставление спектрального состава микроколебаний на участке Куркиеки со спектром микроколебаний на двух других, сложенных близкими по составу горными породами, но расположенных в зоне активных региональных разломов, показало более высокую (в три и более раз) современную активность (подвижность) структурно-тектонических блоков, находящихся в зоне разломов. Предполагается, что отмеченное обусловлено разуплотнением среды в полосе динамического влияния активных региональных разломов.

Ключевые слова: массив горных пород, аномалии спектра микросейсмических колебаний, подвижность структурно-тектонических блоков.

Введение

Микросейсмические колебания (сейсмический шум, микровибрации) возбуждаются источниками разного происхождения, частотного состава и временного режима. Различают экзо- и эндогенные источники, первые из которых связаны с возмущениями от прохождения штормовых фронтов, различных видов антропогенной деятельности, лунно-солнечных приливов. Вторые обусловлены напряжениями, возникающими в результате механических, термических и химических процессов внутри среды, даже если ее поверхность не испытывает никаких внешних механических воздействий. Кроме того, амплитуда и спектральный состав микросейсмических колебаний в точке их наблюдения зависят от резонансных свойств горных пород, которые, в свою очередь, определяются их блоковым строением и упругими свойствами.

Начиная с 70-х годов прошлого века, исследуются связи микросейсмических колебаний со свойствами, строением и геодинамикой геологической среды. В многочисленных публикациях показаны возможности использования параметров микроколебаний для решения широкого спектра научных и практических задач. Так, они успешно применяются при изучении строения верхних слоев земной коры до глубины 10–20 и более километров [Гордеев, Чебров, 1979; Королева, Яновская, Патрушева, 2009; Цуканов, Горбатиков, 2015], при выделении крупных блоков горных пород, неотектонических структур и трассировании тектонических нарушений [Надежка и др., 2003; Сафронич, Надежка, 2008; Орлов, Трезуб, 2009; Орлов, 2011], в инженерной сейсмологии для оценки сейсмической реакции грунтов при сейсмическом микрорайонировании [Табулевич, 1986], при определении мощности рыхлых отложений в широком диапазоне (от десятков до тысяч метров и более) [Seht, Wohlenberg, 1999], для диагностики механического состояния массивов горных пород и локальных участков земной коры [Спивак, 1994; Адушкин, Спивак, Спунгин, 1997; Спунгин, Дубиня, Иванченко, 1997; Локтев, 1998; Кочарян, Спивак, 2003].

Выделение эндогенной составляющей микроколебаний, которая по определению несет информацию о геологической среде, представляет известные трудности, поскольку в эпоху современной индустриализации амплитуда сейсмических колебаний вследствие экзогенных источников антропогенного генезиса может повсеместно значительно превышать уровень эндогенных микроколебаний, в особенности в дневное время суток [Капустян, 2003]. В связи с этим многие исследователи вводят собственные определения используемых ими на практике сейсмических микроколебаний, регистрируемых в условиях пренебрежимо малой амплитуды сигналов экзогенной природы. В частности, используются понятия микросейсмического фона [Спивак, Спунгин, Дубиня, 1997], сейсмических микроколебаний [Спивак, Спунгин, 1998], микросейсмического отклика [Сероглазов, 2003], микросейсмического шума [Орлов, 2011], фоновых микроколебаний [Спивак, Кишкина, 2004], микросейсмического поля [Сафронич и др., 2018], которые рассматриваются вне зависимости от природы источника. По определению [Кочарян, Спивак, 2003], это “участки сейсмической записи, характеризующиеся минимальной статистической амплитудой (уровня $\sim n \cdot (10^{-9} - 10^{-6})$ м/с) в выбранном временном интервале, рассматриваемые как колебания собственно блочной системы горных пород и ее отклика на внешние возмущения”. Согласно расчетной модели релаксационного процесса, представленной в [Кочарян, Спивак, 2003; Спивак, 2010], активные структурно-тектонические блоки горных пород в спектре рассматриваемых колебаний выделяются положительными аномалиями (пиками), частота которых определяется размером структурного блока, а амплитуда аномалии характеризует его современную активность (подвижность).

В настоящей статье приведены результаты геологических и микросейсмических исследований массива горных пород на участке Куркиеки, расположенном примерно в 12 км к северо-востоку от пос. Куркиеки Лахденпохского района Республики Карелия (рис. 1, слева). Целью исследований было изучение блокового строения и напряженного состояния массива, в частности, выделение в нем структурно-тектонических блоков, подвергающихся в настоящее время минимальным латеральным напряжениям. Массив сложен выходящими на дневную поверхность гранат-биотитовыми гнейсами палеопротерозойского возраста (см. рис. 1, справа). По данным геологических, геофизических материалов и результатам анализа космоснимков в районе Северного Приладожья выделены две системы глубинных разломов – ортогональная и диагональная, – которые определяют современное блоковое строение земной коры региона [Хазов, Шаров, Исанина, 2004]. При этом преимущественное распространение имеет диагональная система, формирующая границы геоблоков.

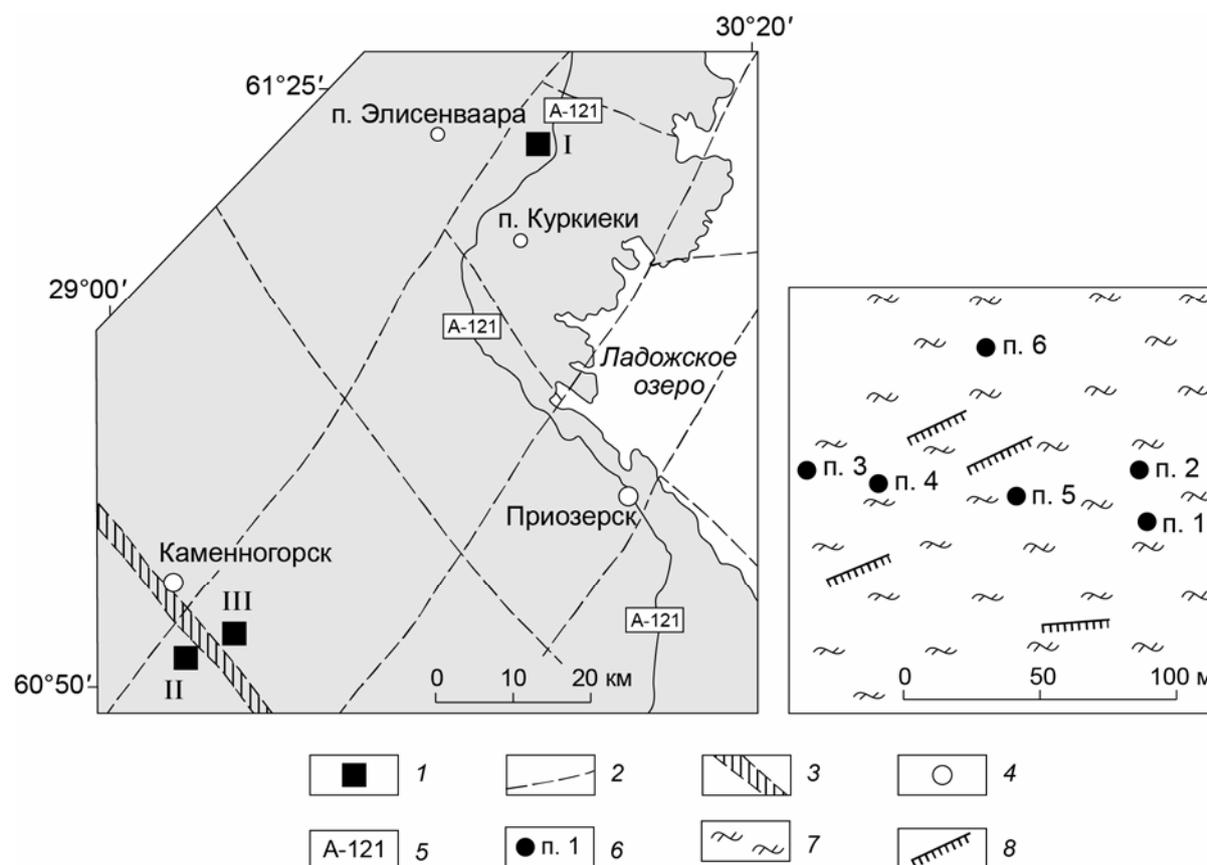


Рис. 1. Слева: расположение участков наблюдения сейсмических микроколебаний Куркиеки (I), Вуокса (II), Пещеры Иностранцева (III) на схематической карте глубинных разломов Северного Приладожья (по [Хазов, Шаров, Исанина, 2004] с дополнениями): 1 – участки наблюдения; 2 – длительно развивающиеся глубинные разломы свекофеннской и рифейско-палеозойской рифтогенных систем; 3 – зона Вуоксинских разломов по [Shvarev et al., 2018]; 4 – населенные пункты; 5 – автомобильная трасса. Справа: схема расстановки сейсмоприемников на участке Куркиеки: 6 – пункты сейсмических наблюдений с указанием номера; 7 – гранат-биотитовые гнейсы палеопротерозойского возраста; 8 – крупные трещины с высотой уступов 0.5–0.8 м

Fig. 1. Left: location of the seismic microoscillations observation sites Kurkieki (I), Vuoksa (II), Inostrantsev's caves (III) on the schematic map of deep faults of the Northern Ladoga area (by [Kha-zov, Sharov, Isanina, 2004] with additions): 1 – observation sites; 2 – long-developing deep faults of the Svecofennian and Riphean-Paleozoic rift systems; 3 – zone of the Vuoksin faults by [Shvarev et al., 2018]; 4 – settlements; 5 – highway. Right: layout scheme of seismic observation points on the Kurkieki site: 6 – points of seismic observations with their numbers; 7 – garnet-biotite gneisses of Paleoproterozoic age; 8 – large cracks with ledges of 0.5–0.8 m

При геологическом обследовании участка Куркиеки установлено его мелкоблоковое строение, выраженное уступами высотой 0.5–0.8 м, которые формируют пологий современный рельеф с размерами блоков в пределах первых десятков метров. Положение выделенных уступов показано справа на рис. 1. Участок ограничен вертикальными и крутопадающими (углы падения от 30° до 80°) региональными и локальными разломами сбросового характера, что свидетельствует о формировании участка в условиях локального растяжения. Мелкоблоковое строение участка может быть связано с общим региональным полем сжатия.

Основной задачей проведенных микросейсмических исследований было определение размера активных структурно-тектонических блоков, слагающих массив, и оценка их активности в разных частях массива. Авторы полагают, что высокая активность (подвижность) структурного блока может свидетельствовать о низких величинах сжимающих латеральных сил, действующих на данный блок. Работы на участке Куркиеки проводились с 9 по 14 сентября 2018 г. и носили научно-исследовательский опытно-экспериментальный характер. Выбранный для работ участок находился на удалении более 10 км от ближайших поселков Куркиеки и Элисенваара, что обеспечивало достаточно низкий уровень техногенных сейсмических помех. Значительные помехи наблюдались лишь при движении транспорта по автомагистрали А-121 Приозерск – Сортавала, проходящей на расстоянии 1.5 км к югу от участка, но в ночное время количество машин на трассе было невелико, благодаря чему уровень регистрируемых сейсмических микроколебаний опускался до значений, позволявших выделить спектральные аномалии резонансных колебаний блоковых структур горных пород.

Методика наблюдения и обработки сейсмических микроколебаний

Наблюдения сейсмических микроколебаний выполнены на шести пунктах, расположенных на расстоянии от 20 до 130 м друг от друга (см. рис. 1, *справа*). Для наблюдений использовались аттестованные электронные сейсмоприемники СМ-3КВ, настроенные на измерение скорости сейсмических микроколебаний с коэффициентом преобразования сейсмического канала $\sim 4 \cdot 10^5$ В/м/с. Рабочий диапазон частот 0.45–40 Гц. В аттестованной полосе 0.8–25 Гц неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сейсмоприемников не превышает ± 3 %. Сейсмоприемники с помощью алебаstra крепились на субгоризонтальных обнажениях коренных пород.

Для исключения временных и выделения пространственных изменений сейсмических микроколебаний в пределах исследуемого массива наблюдения проводились двумя станциями – базовой и рабочей, первая из которых в течение всего периода работ располагалась на п. 1, а вторая перемещалась по участку и каждые сутки устанавливалась на новом пункте. Всего наблюдения с рабочей станцией выполнены на пяти пунктах. Переустановка рабочей станции осуществлялась днем; время наблюдения с рабочей станцией на каждом из п.п. 2–6 составляло 10–15 ч, включая спокойный ночной период. На базовой станции выполнялась трехкомпонентная регистрация, на рабочей – однокомпонентная (измерялась только вертикальная составляющая).

Сигналы с обеих станций передавались по соединительным кабелям на центральный пункт, где обеспечивалась синхронизация сейсмограмм и проводилась их регистрация на нетбук с 14-разрядным аналого-цифровым преобразователем при частоте опроса 200 Гц на канал. Регистрация проводилась непрерывно, записи формировались в виде отдельных файлов длительностью 30 мин. В начале работ обе станции – базовая и рабочая – были установлены рядом на п. 1, и в течение 2.5 часов выполнялась регистрация колебаний для оценки идентичности АЧХ сейсмоприемников (и сейсмических каналов в целом) по вертикальной составляющей используемых станций.

Обработка данных наблюдений включала следующие этапы.

1. Визуальный анализ первичных сейсмограмм и отбор для каждого пункта наблюдений файлов, содержащих записи, полученные в ночное безветренное время с минимальным количеством сигналов техногенного происхождения (проезд автотранспорта, карьерные взрывы и др.).

2. Расчет спектральной плотности сейсмических микроколебаний методом быстрого преобразования Фурье и построение ее осредненных графиков для отобранных сейсмограмм. Вычисления выполнены по программе П.Б. Каазика, разработанной в ИДГ РАН. Осреднение проведено по 100 реализациям длительностью 10.25 с, выбранных случайным образом в пределах периода регистрации продолжительностью 30 мин.

3. Анализ спектральной структуры фоновых сейсмических микроколебаний. Определение различий между спектральными плотностями вертикальных составляющих колебаний, зарегистрированных одновременно базовой и рабочей станциями. Выделение частотных аномалий (пиков) в спектре фоновых микроколебаний и определение размера активных структурно-тектонических блоков горных пород, слагающих исследуемый массив. Для вычисления размера активного блока L использовалось выражение $L = (10^{-1} / \pi f) \sqrt{G / \rho}$ из [Локтев, 1998], где f – частота собственных колебаний блока; $G = 4000 \cdot 10^7$ Па – модуль сдвига, принятый согласно данным для гранита из [Кошкин, Ширкевич, 1972]); $\rho = 2700$ кг/м³ – объемный вес, принятый равным среднему показателю для гранитов.

Результаты микросейсмических исследований и их обсуждение

В результате выполненных базовой и рабочей станциями синхронных наблюдений на п. 1 была установлена идентичность АЧХ их сейсмоприемников, регистрирующих вертикальные составляющие. Графики спектральной плотности сейсмических микроколебаний, зарегистрированных на п. 1 сейсмоприемниками базовой и рабочей станций, практически одинаковы во всем диапазоне рабочих частот (рис. 2).

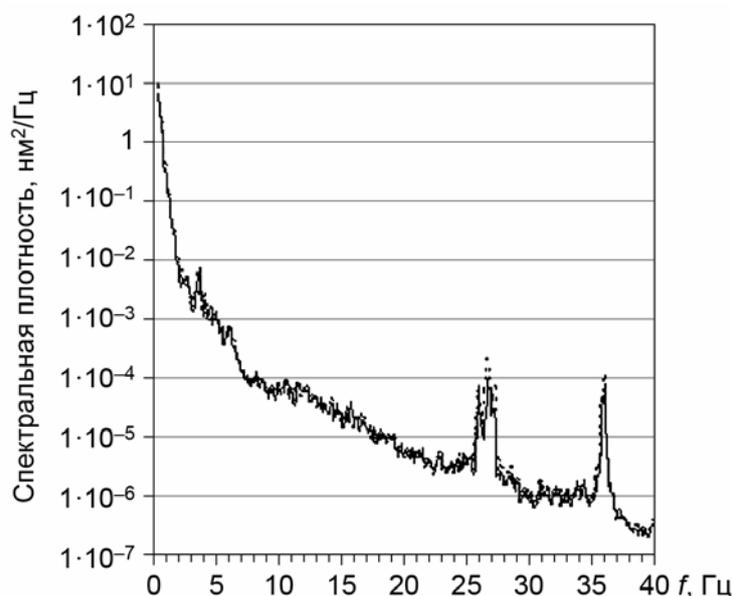


Рис. 2. Участок Куркиеки, п. 1. Наблюдения 09.09.2018 г. Осредненные спектры плотности вертикальной составляющей микросейсмических колебаний, зарегистрированных в период с 15:29 по 15:59 LT базовой (сплошная кривая) и рабочей (пунктирная кривая) станциями

Fig. 2. Kurkieki site, p. 1. Observations 09.09.2018. Averaged density spectra of the vertical component of microseismic oscillations recorded in the period from 15:29 to 15:59 LT by base (solid curve) and working (dotted curve) stations

Количественно оценить меру идентичности позволяет приведенный на рис. 3 график отношения спектров для двух станций. Величина отношения в пределах частотного диапазона 0.8–25.0 Гц (с аттестованной неравномерностью АЧХ сейсмоприемников $<\pm 3\%$) колеблется относительно единицы преимущественно в пределах 0.8–1.2. Минимальное отношение составляет 0.50 на частоте 2.25 Гц, максимальное – 1.58 на частоте 18.2 Гц. Среднеквадратическое отклонение величины отношения от единицы в пределах всего диапазона 0.8–25 Гц составляет ± 0.0267 и не превышает величину аттестованной точности приборов.

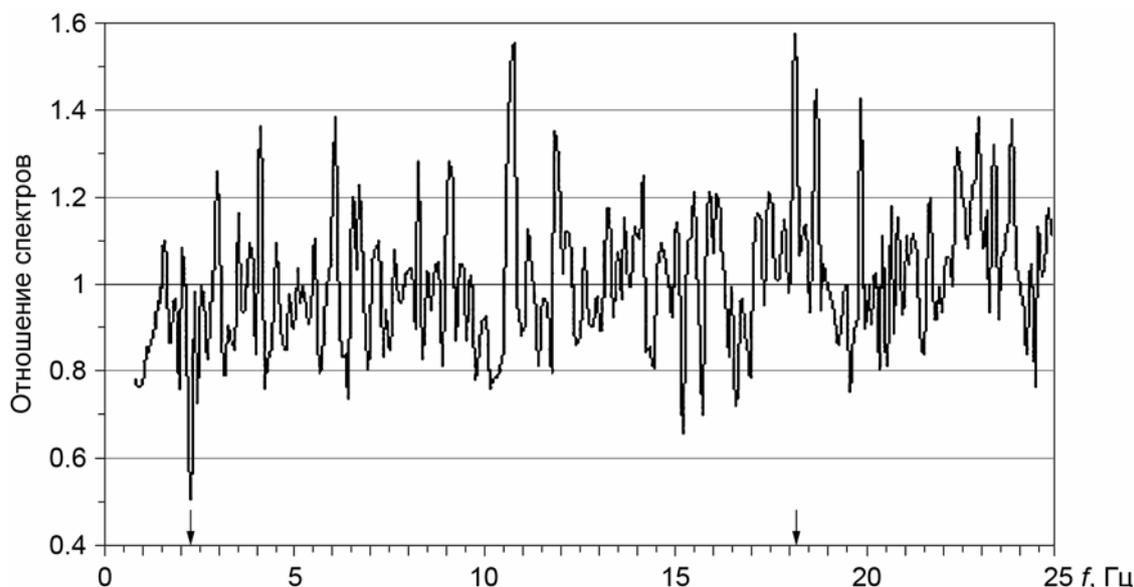


Рис. 3. Участок Куркиеки, п. 1. График отношения спектральной плотности вертикальной составляющей микроколебаний на базовой станции к спектру колебаний на рабочей станции. Стрелками на горизонтальной оси отмечены частоты, соответствующие минимальному и максимальному значениям отношения спектров

Fig. 3. Kurkieki site, p. 1. Plot of the ratio of the spectral density of the vertical component of microoscillations at the base station to the oscillation spectrum at the work station. The arrows on the horizontal axis indicate frequencies corresponding to the minimum and maximum values of the ratio of spectra

По результатам визуального анализа сейсмограмм, зарегистрированных рабочей станцией на п.п. 2–6 участка Куркиеки, установлено, что записи с наименьшим количеством сигналов экзо- и техногенной природы получены в ночной период с 01:30 до 03:00 LT. Сравнение спектров микроколебаний, зарегистрированных одновременно базовой станцией, постоянно находящейся на п. 1, и ежедневно перемещаемой от п. 2 до п. 6 рабочей станцией, показало, что спектральная плотность микроколебаний на всех пунктах наблюдений весьма близка к таковой на п. 1.

На рис. 4 в качестве примера приведены графики спектров микроколебаний, зарегистрированных одновременно базовой станцией на п. 1 и рабочей станцией на п.п. 2, 3, которые удалены от п. 1 соответственно на минимальное (20 м) и максимальное (130 м) расстояние. Идентичность этих графиков свидетельствует об отсутствии различий в размерах активных блоков в пределах участка Куркиеки и, видимо, о подобию (единообразии) современной блоковой структуры массива горных пород в пределах исследуемого участка.

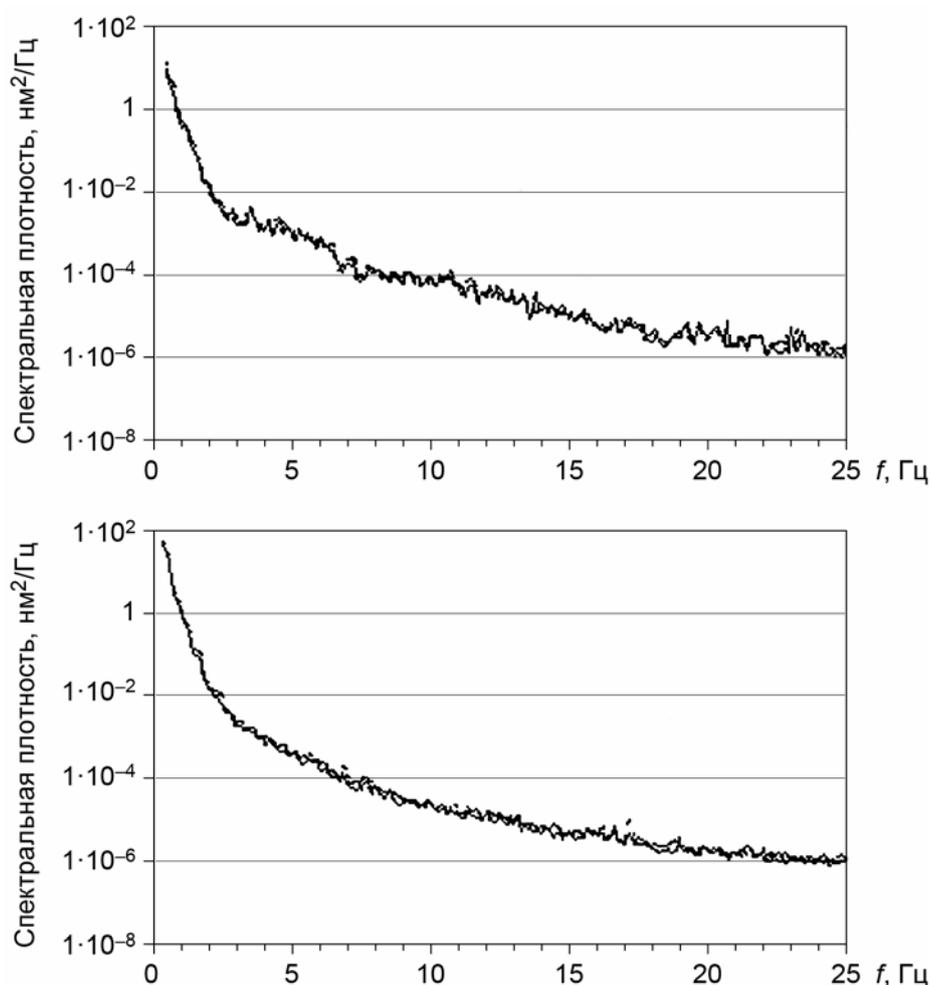


Рис. 4. Участок Куркиеки. Осредненные спектры плотности вертикальной составляющей сейсмических микроколебаний, зарегистрированных 10.09.2018 г. в период с 01:55 по 02:25 LT на п.п. 1, 2 (*вверху*) и 11.09.2018 г. в период с 01:35 по 02:05 LT на п.п. 1, 3 (*внизу*)

Fig. 4. Kurkiеki site. Averaged density spectra of the vertical component of seismic microoscillations recorded on 10.09.2018 at the p.p. 1, 2 in the period from 01:55 to 02:25 LT (*top*) and on 11.09.2018 at the p.p. 1, 3 in the period from 01:35 to 02:05 LT (*bottom*)

Для выделения аномалий спектра, связанных с резонансными колебаниями слагающих исследуемый массив структурных блоков горных пород, и определения размеров наиболее активных блоков из массива записей на п. 1 были отобраны сейсмограммы с наиболее низким средним уровнем спектра. Анализ графиков спектра для ночных наблюдений показал, что минимальный уровень спектральной плотности колебаний наблюдался 11.09.2018 г. Приведенные на рис. 5, *вверху* графики спектральной плотности микроколебаний, зарегистрированных для пяти получасовых ночных интервалов, демонстрируют диапазон временных вариаций спектра в наиболее спокойные промежутки времени. На рис. 5, *внизу* в более крупном масштабе приведены графики спектра для двух из этих периодов – 01:05–01:35 и 01:35–02:05 LT, которые в пределах аттестованного частотного диапазона 0.8–25 Гц характеризуются наименьшим уровнем спектральной плотности микроколебаний. Спектральные аномалии, выделяемые на этих графиках, использовались нами для определения размера активных структурных блоков, слагающих массив горных пород на участке Куркиеки.

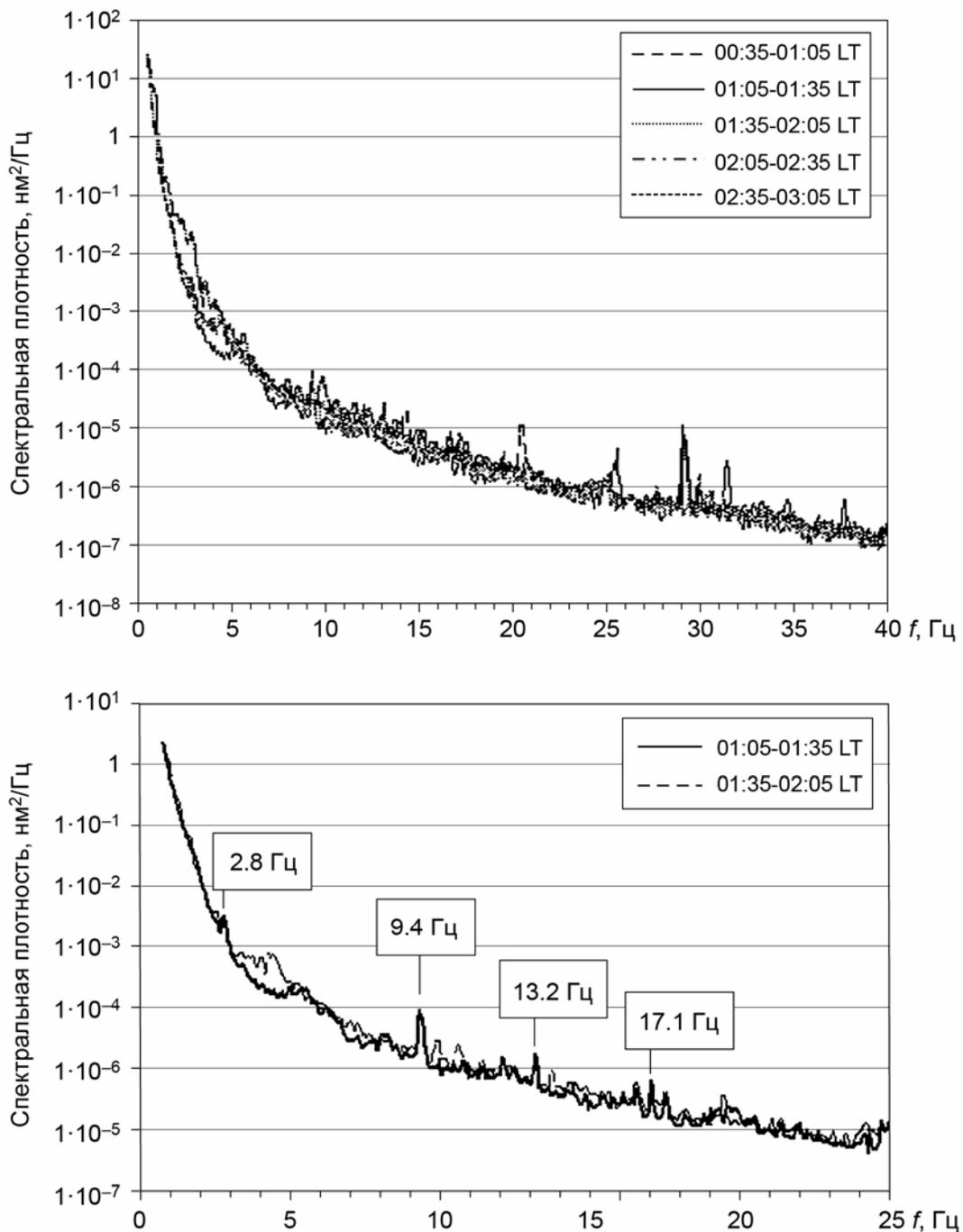


Рис. 5. Участок Куркиеки, п. 1. Наблюдения 11.09.2018 г. Осредненные спектры плотности микроколебаний для пяти ночных получасовых временных интервалов с 00:35 до 03:05 LT (*вверху*) и двух из них, характеризующихся наименьшим уровнем спектральной плотности микроколебаний (*внизу*). На нижнем фрагменте указаны значения частот выделенных аномалий спектра

Fig. 5. Kurkieki site, p. 1. Observations 11.09.2018. Averaged density spectra of microoscillations for five night half-hour time periods from 00:35 to 03:05 LT (*top*) and two of them characterized by the lowest level of spectral density of microoscillations (*bottom*). The bottom fragment indicates the frequency of the selected spectrum anomalies

Всего нами выделено четыре спектральные аномалии с частотами 2.8, 9.4, 13.2 и 17.1 Гц, присутствующие на графиках, построенных для обоих рассматриваемых полу-часовых периодов регистрации микроколебаний (см. рис. 5, *внизу*). Частоты этих аномалий не отвечают ряду $50/k$, где $k=1, 2, \dots, n$, который может быть связан с работой разного вида электромеханических преобразователей; по всей видимости, их появление обусловлено собственными резонансными колебаниями структурных блоков горных пород на исследуемом участке. Об этом же свидетельствует и траектория движения частиц грунта в области выделенных частотных аномалий, не имеющая выдержанной во времени поляризации. Пример такой траектории движений в горизонтальной плоскости для частоты 2.8 Гц, полученной с использованием фильтра Гаусса с высокой крутизной среза, приведен на рис. 6.

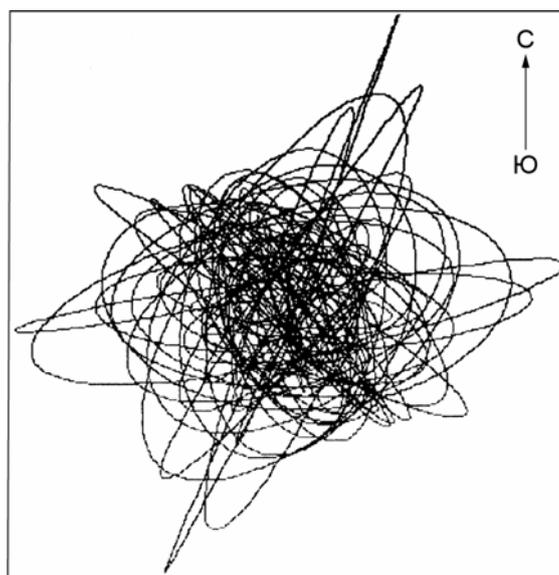


Рис. 6. Участок Куркиеки, п. 1. Наблюдения 11.09.2018 г. Траектория движения частиц грунта в горизонтальной плоскости вблизи частоты 2.8 Гц в период с 01:06:00 по 01:06:21 LT

Fig. 6. Kurkieki site, p. 1. Observations 11.09.2018. Movement trajectory of the soil in the horizontal plane near the frequency of 2.8 Hz in the period from 01:06:00 to 01:06:21 LT

Размеры структурных блоков, собственные резонансные колебания которых реализуются на частотах аномалий спектра (см. рис. 5, *внизу*), составляют соответственно 44, 13, 9.4 и 7.2 м. Максимальная по амплитуде спектральная аномалия (до порядка над средним уровнем) наблюдается на частоте 9.4 Гц; минимальная (до трех раз превышающая средний уровень спектра) – на частоте 2.8 Гц. Если допустить, что высокая активность (подвижность) структурного блока свидетельствует о низкой величине сжимающих сил, действующих на блок, то на участке Куркиеки наименее зажатými являются структурные блоки с поперечным размером около 13 м.

Спектры сейсмических микроколебаний на участке Куркиеки были сопоставлены (рис. 7) с графиками спектральной плотности микроколебаний, зарегистрированных нами ранее с использованием того же комплекта аппаратуры на участках Вуокса и Пещеры Иностранцева, которые также находятся в Северном Приладожье (см. врезку рис. 1) и сложены близкими по составу палеопротерозойскими породами¹.

¹ Методика наблюдений на названных участках приведена в [Спунгин, Зыков, 2018].

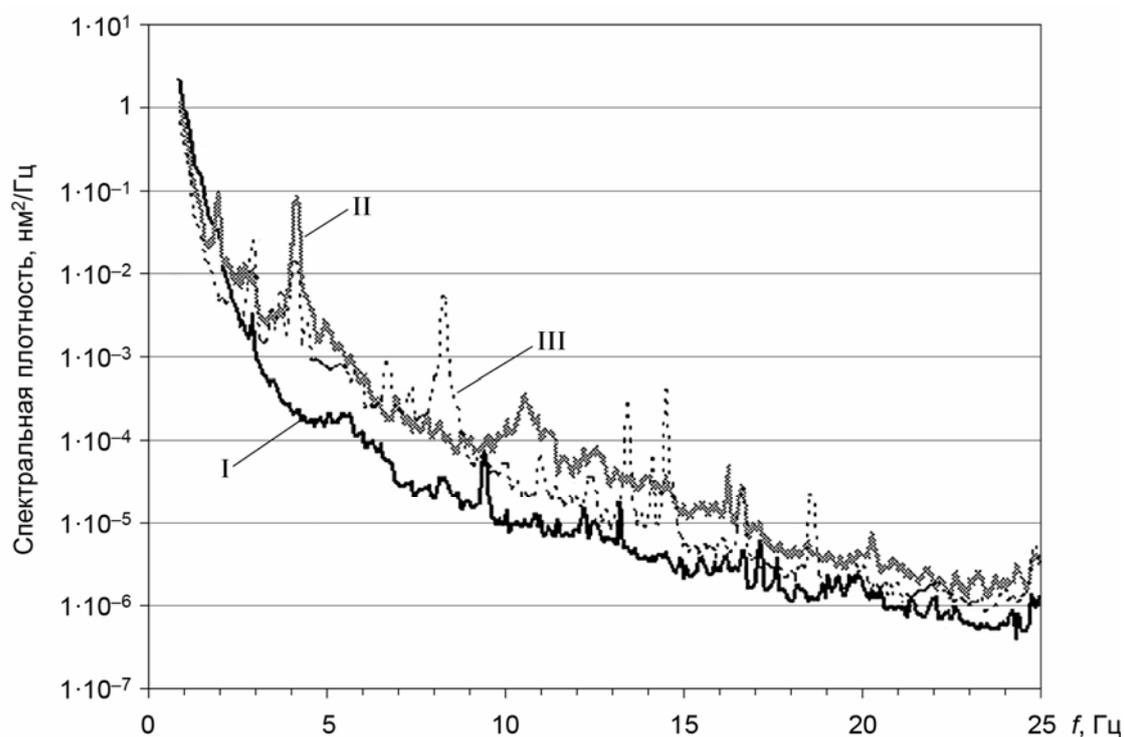


Рис. 7. Сопоставление осредненных спектров плотности сейсмических микроколебаний, зарегистрированных на трех участках наблюдений в Северном Приладожье: I – Куркиеки (наблюдения 11.09.2018 г. с 01:05 по 01:35 LT); II – Вуокса (наблюдения 25.07.2013 г. с 01:18 по 01:48 LT); III – Пещеры Иностранцева (наблюдения 07.08.2012 г. с 02:23 по 02:53 LT)

Fig. 7. Comparison of averaged density spectra of seismic microoscillations recorded at three observation sites in the Northern Ladoga area: I – Kurkieki (observations 11.09.2018 from 01:05 to 01:35 LT); II – Vuoksa (observations 25.07.2013 from 01:18 to 01:48 LT); III – Inostrantsev's caves (observations 07.08.2012 from 02:23 to 02:53 LT)

Для сопоставления были отобраны спектры микроколебаний, также зарегистрированных в ночной безветренный период. Можно видеть (см. рис. 7), что уровень спектральной плотности микроколебаний на участках Вуокса и Пещеры Иностранцева на порядок и более выше уровня спектра на участке Куркиеки в пределах практически всего аттестованного частотного диапазона использованных сейсмоприемников. При этом количество пиковых аномалий спектральной плотности на этих участках заметно больше, чем на участке Куркиеки, и их амплитуды выше.

На участке Пещеры Иностранцева высокими амплитудами, в три и более раз превышающими средний уровень спектральной плотности, выделяются аномалии на частотах 2.9, 4.1, 8.0, 8.6, 11.4, 12.5, 14.6, 16.6 и 20.0 Гц, на участке Вуокса – на частотах 2.8, 4.0, 10.4, 12.5, 13.5 и 16.2 Гц. Аномалии с частотами 12.5 и 16.6 Гц отвечают ряду $50/k$ и связаны, по-видимому, с работой электромеханических преобразователей. Наиболее интенсивная спектральная аномалия с частотой 4.0 Гц на участке Вуокса и 4.1 Гц на участке Пещеры Иностранцева вызваны явно техногенной причиной, поскольку микроколебания среды в области этой частоты заметно поляризованы в горизонтальной плоскости (рис. 8). На частоте остальных аномалий спектральной плотности на этих двух участках поляризации микроколебаний не наблюдается, и природа прослеживаемых аномалий обусловлена, очевидно, резонансными колебаниями структурных блоков. Значения частот аномалий, связанных с активностью (подвижностью) структурно-тектонических блоков горных пород, для трех участков приведены в таблице.

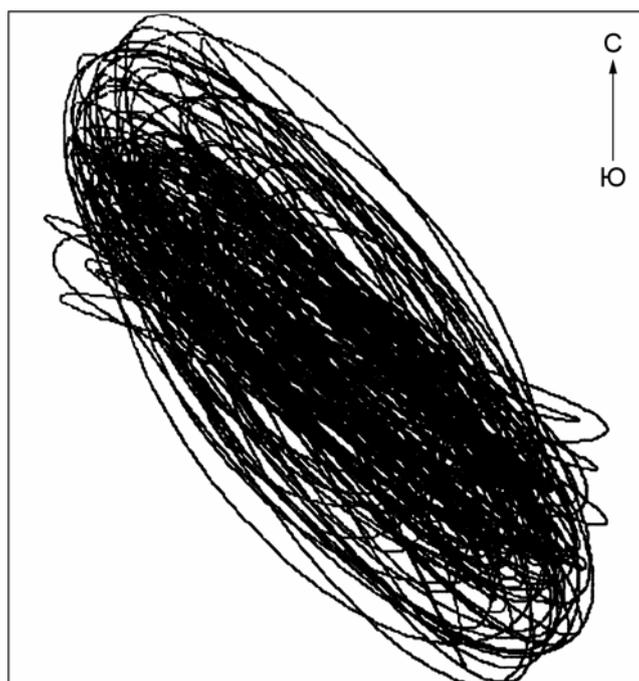


Рис. 8. Участок Вуокса. Наблюдения 25.07.2013 г. Траектория движения частиц грунта в горизонтальной плоскости вблизи частоты 4.0 Гц в период с 02:18 по 02:48 LT

Fig. 8. Vuoksa site. Observations 25.07.2013. Movement trajectory of the soil in the horizontal plane at a frequency of 4.0 Hz in the period from 02:18 to 02:48 LT

Частоты аномалий спектральной плотности сейсмических микроколебаний на исследованных участках Северного Приладожья

Название участка	Частота аномалий спектра сейсмических микроколебаний, Гц			
	Куркиеки (I)	2.8	9.4	13.2
Вуокса (II)	2.8	10.4	13.5	16.2
Пещеры Иностранцева (III)	2.9	8.0, 8.6	11.4, 14.6	20.0

Обращает на себя внимание одинаковое количество аномалий спектра на участках Куркиеки и Вуокса и их близкие частоты. Это свидетельствует о подобии структурного строения данных участков и, возможно, объясняется близкими физико-механическими свойствами слагающих их горных пород. На участке Пещеры Иностранцева количество спектральных аномалий заметно больше, что связано, очевидно, с более сложным (дробным) блоковым строением этого участка по сравнению с двумя другими. Отмеченное, вероятнее всего, обусловлено расположением участка Пещеры Иностранцева в зоне интенсивных сейсмодетформаций, являющихся следствием нескольких палеоземлетрясений, мощность которых могла составлять VIII–IX баллов¹.

Вместе с тем, на всех трех рассматриваемых участках выделяется спектральная аномалия с частотой 2.8–2.9 Гц, что свидетельствует об определенном сходстве блокового строения участков и обусловлено, по-видимому, особенностями структуры Северного Приладожья.

¹ По оценкам, приводимым в [Никонов и др., 2014].

Однако надо отметить, что амплитуды спектральных аномалий, прослеживаемых на трех рассматриваемых участках, различны. Так, амплитуды спектра сейсмических микроколебаний в области частоты 2.8–2.9 Гц на участках Вуокса и Пещеры Иностранцева, обусловленные активностью (подвижностью) структурно-тектонических блоков с размером ~44 м, в пять (Вуокса) и восемь (Пещеры Иностранцева) раз превышают амплитуду аналогичной по частоте аномалии на участке Куркиеки (см. рис. 7). Амплитуда спектральной плотности колебаний в области частоты 9 Гц, обусловленная подвижностью блоков с размером около 13–14 м, на участке Вуокса примерно в 3 раза превышает таковую на участке Куркиеки.

По всей видимости, более высокая амплитуда спектральных аномалий на участках Вуокса и Пещеры Иностранцева связана с тем, что они расположены в региональной зоне Вуоксинских разломов, состоящей из нескольких ветвей северо-западного простираения общей протяженностью ~100 км¹.

Более высокая подвижность структурных блоков в пределах зоны связана, скорее всего, с разуплотнением блоковой среды в области динамического влияния Вуоксинских разломов. Мощность полосы динамического влияния разломных зон по [Шерман и др., 1991] составляет от 1/20 до 1/10 их длины и вблизи отдельных ветвей зоны Вуоксинских разломов может достигать, соответственно, сотен метров и первых километров. Само разуплотнение среды в пределах разломных зон свидетельствует в общем случае о дефиците латерального давления на слагающие их структурно-тектонические блоки. Таким образом, относительно высокая интенсивность аномалий спектра микросейсмических колебаний связана с напряженным состоянием блоковой среды в пределах зоны Вуоксинских разломов, и, соответственно, величина аномалий спектра может являться характеристикой напряженного состояния структурно-тектонических блоков.

Выводы

Установлено, что спектральный состав фоновых микросейсмических колебаний в разных пунктах участка Куркиеки (на площади ~100×150 м) практически одинаков, свидетельствуя о подобных размерах активных структурно-тектонических блоков в пределах исследуемого массива и, очевидно, об однородности его блокового строения. Определены размеры активных структурно-тектонических блоков в пределах исследуемого участка. Установлено, что наибольшей амплитудой резонансных фоновых микроколебаний и, соответственно, меньшей стесненностью (зажатостью) характеризуются блоки с размером 13.0 м.

Проведено сопоставление спектрального состава микросейсмических колебаний на участке Куркиеки с составом спектра микроколебаний на двух других участках (Вуокса и Пещеры Иностранцева), сложенных близкими по составу и возрасту горными породами, но находящимися в зоне региональных Вуоксинских разломов. Установлено, что современная активность (подвижность) структурно-тектонических блоков в зоне Вуоксинских разломов, судя по амплитуде аномалий спектра микроколебаний, от трех до восьми раз выше активности участка Куркиеки, удаленного от крупных разломных зон на расстояние более 10 км. Предполагается, что более высокая амплитуда спектральных аномалий на участках Пещеры Иностранцева и Вуокса связана с разуплотнением среды в пределах области динамического влияния зоны Вуоксинских разломов.

¹ Строение и современная активность зоны Вуоксинских разломов подробно обсуждаются в [Никонов и др., 2014; Shvarev et al., 2018].

Показана возможность использования микросейсмических колебаний для определения размера активных структурно-тектонических блоков и оценки напряженного состояния массива горных пород в условиях Фенноскандинавского щита.

Финансирование

Исследования выполнены в соответствии с государственными заданиями № 0146-2019-0006 и № №АААА-А18-118020290175-2.

Литература

- Адушкин В.В., Стивак А.А., Спунгин В.Г.* Диагностика механического состояния локальных участков земной коры на основе изучения релаксационных процессов // *Геоэкология*. 1997. № 4. С.45–52.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н.* Применение штормовых микросейсм для изучения верхнего строения земной коры // *Вулканология и сейсмология*. 1979. № 2. С.37–42.
- Капустян Н.К.* Техногенное воздействие на литосферу – объект планетарных исследований XXI века // *Проблемы геофизики XXI века / Под ред. А.В. Николаева*. Кн. 2. М.: Наука, 2003. С.213–244.
- Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С.* Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // *Физика Земли*. 2009. № 5. С.3–14.
- Кочарян Г.Г., Стивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 423 с.
- Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.* Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1972. 256 с.
- Локтев Д.Н.* Микросейсмические колебания как характеристика механической устойчивости среды // *Динамические процессы в геосферах под действием внешних и внутренних потоков энергии и вещества. (Геофизика сильных возмущений): Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 1998. С.83–91.*
- 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 // *Вестн. Воронеж. ун-та. Геология*. 2003. № 2. С.179–185.
- Никонов А.А., Шварев С.В., Сим Л.А., Родкин М.В., Бискэ Ю.С., Маринин А.В.* Скальные палеосейсмодеформации на Карельском перешейке (ключевой участок “Пещеры Иностранцева”, Ленинградская область) // *Докл. РАН*. 2014. Т. 457, № 5. С.591–596.
- Орлов Р.А.* Опыт использования микросейсмического шума для решения геологических задач в условиях платформы (на примере Воронежского кристаллического массива) // *Вестник ВГУ. Сер. Геология*. 2011. № 1. С.184–192.
- Орлов Р.А., Трегуб А.И.* Отражение в сейсмических шумах неотектонических структур Воронежского кристаллического массива // *Докл. РАН*. 2009. Т. 426, № 3. С.393–396.
- Сафронич И.Н., Надежка Л.И.* Некоторые особенности микросейсмического процесса в пределах региональных структурно-тектонических элементов Воронежского кристаллического массива // *Докл. РАН*. 2008. Т. 418, № 5. С.689–692.
- Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., Семёнов А.Е., Пивоваров С.В.* Отражение в микросейсмическом поле тектонических нарушений (на примере ВКМ) // *Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI научно-практической Щукинской конференции с международным участием (г. Москва, 1–4 октября 2018 г.) / Под ред. Е.А. Рогожина и Л.И. Надежка*. М.: ИФЗ РАН, 2018. С.340–343.
- Сероглазов Р.Р.* Особенности микросейсмического отклика геофизической среды на динамическое воздействие в условиях платформенных областей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2003. 171 с.

- Спивак А.А. Релаксационный контроль и диагностика массивов горных пород // ФТПРПИ. 1994. № 5. С.8–26.
- Спивак А.А. Приповерхностная геофизика: учебное пособие. М.: ИДГ РАН; МФТИ, 2010. 208 с.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. 2004. № 7. С.35–49.
- Спивак А.А., Спунгин В.Г. Определение действующих напряжений и особенностей деформирования блочных структур на основе регистрации микроколебаний геологической среды // Геоэкология. 1998. № 4. С.71–88.
- Спивак А.А., Спунгин В.Г., Дубиня В.А. Оперативная оценка микросейсмического фона с помощью мобильного регистрирующего комплекса // Физика Земли. 1997. № 1. С.79–83.
- Спунгин В.Г., Дубиня В.А., Иванченко Г.Н. Экспрессная диагностика структуры и геодинамики массива горных пород на основе анализа микросейсмических колебаний // Вулканология и сейсмология. 1997. № 6. С.42–50.
- Спунгин В.Г., Зыков Д.С. Микросейсмичность локальных участков юго-востока Фенноскандинавского щита // Вулканология и сейсмология. 2018. № 1. С.1–12.
- Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука, 1986. 151 с.
- Хазов Р.А., Шаров Н.В., Исанина Э.В. Глубинное строение и металлогения Приладожья // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С.55–74.
- Цуканов А.А., Горбатилов А.В. Метод микросейсмического зондирования: Влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений // Физика Земли. 2015. № 4. С.94–102.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, СО, 1991. Т. 1. 261 с.
- Seht M.I., Wohlenberg J. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1999. V. 89. P.250–259.
- Shvarev S.V., Nikonov A.A., Rodkin M.V., Poleshchuk A.V. The active tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: parameters of paleoearthquakes estimated from bedrock and soft-sediment deformation features // Bull. Geological Society of Finland. 2018. V. 90. P.257–273.

Сведения об авторах

СПУНГИН Вадим Геннадьевич – кандидат технических наук, ведущий инженер, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-79-52. E-mail: spungin@idg.chph.ras.ru

ШЕКОВ Виталий Александрович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт геологии Карельского научного центра РАН. 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11. Тел.: +7(921) 726-02-73. E-mail: shekov@krc.karelia.ru

ИВАНОВ Андрей Алексеевич – научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН. 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11. Тел.: +7(911) 401-55-13. E-mail: ivanov@krc.karelia.ru

ЛЕБЕДЕВ Артем Анатольевич – старший инженер-геофизик, Институт геологии Карельского научного центра РАН. 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11. Тел.: +7(953) 525-16-35. E-mail: stayxalert@gmail.com

THE SPECTRAL COMPOSITION OF MICROSEISMIC OSCILLATIONS AND SIZES OF ACTIVE STRUCTURAL-TECTONIC BLOCKS OF ROCKS AT THE SITE KURKIEKI (NORTH LADOGA AREA)

V.G. Spungin¹, V.A. Shekov², A.A. Ivanov², A.A. Lebedev²

¹ *Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Institute of Geology Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

Abstract. Observations of microseismic oscillations on the outcrops of the rock mass composed by Paleoproterozoic gneisses were carried out in order to study the structure and stress state of the rock mass, in particular, to determine the size of the structural-tectonic blocks of rocks currently exposed to minimal lateral stresses. The results of spectral analysis of micro-oscillations are used to determine the size of the currently active blocks by the frequency of spectrum anomalies. It seems that the most active, mobile at the present stage of geological history, blocks are also the most unloaded from external stresses.

The identity of the spectrum of background microoscillations in different parts of the studied array is established, which indicates the similarity of the sizes of active structural-tectonic blocks within its limits and the homogeneity of its block structure. The size of the active blocks composing the investigated area is determined by the frequency of spectrum anomalies. The size of the block, which is characterized by the greatest modern activity and, accordingly, less constraint compared to others, is determined.

Comparison of the spectral composition of microoscillations in the study area with the spectrum of micro-oscillations in two other areas, composed of rocks similar in composition but located in the zone of active regional faults, showed that in the fault zone the current activity (mobility) of structural-tectonic blocks is three and more times higher than in the study area. It is assumed that the higher mobility of the blocks in the fault zones is due to the decompaction of the medium in the band of their dynamic influence.

Keywords: rock mass, anomalies of the microseismic oscillations spectrum, mobility of structural-tectonic blocks.

References

- Adushkin V.V., Spivak A.A., Spungin V.G., Diagnostics of the mechanical state of local areas of the earth's crust based on the study of relaxation processes, *Geoecologiya* (Geoecology), 1997, no. 4, pp. 45-52.
- Gordeev E.I and Chebrov V.N., The use of storm microseisms to study the crustal topography, *Vulkanologiya i seismologiya* (Vulcanology and seismology), 1979, no. 2, pp. 37-42.
- Kapustyan N.K., Technogenic impact on the lithosphere – the object of planetary research of the XXI century, in *Problemy geofiziki XXI veka* (Problems of geophysics of the 21st century), Moscow: Nauka, 2003, pp. 213-244.
- Khazov R.A., Sharov N.V., Isanina E.V. Deep structure and metallogeny of the Ladoga area, *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* (Geology and useful minerals of Karelia), Petrozavodsk: KarNC RAN, 2004, no. 7, pp. 55-74.
- Koroleva T.Yu., Yanovskaya T.B., Patrusheva S.S., Implication of seismic noise for determining the structure of the upper Earth Rock Mass, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2009, vol. 45, no. 5, pp. 369-380.
- Kocharyan G.G. and Spivak A.A., *Dinamika deformirovaniya blochnykh massivov gornyh porod* (Dynamics of deformation of block massifs of rocks), Moscow: IKC “Akademkniga”, 2003.
- Koshkin N.I., Shirkevich M.G., *Spravochnik po elementarnoi fizike* (Handbook of Elementary Physics), Moscow: Nauka, 1972.

- Loktev D.N., Microseismic oscillations as a characteristic of the mechanical stability of the environment, in *Dinamicheskie processy v geosferah pod deistviem vneshnih i vnutrennih potokov energii i veschestva. Geofizika sil'nyh vozmuschenii* (Dynamic processes in the geospheres under the action of external and internal flows of energy and substances. Geophysics of strong disturbances), Moscow: IDG RAN, 1998, pp. 83-91.
- Nadezhka L.I., Orlov R.A., Pivovarov S.P., Safronich I.N., Efremenko M.A., About communication of seismic noise parameters with geological and geodynamic features of the Voronezh crystalline massif, in *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geologiya* (Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology), 2003, no. 2, pp. 179-185.
- Nikonov A.A., Shvarev S.V., Sim L.A., Rodkin M.V., Biske Yu.S., Marinin A.V., Paleoseismodeformations of hard rocks in the Karelian isthmus, *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 457, no. 2, pp. 1008-1013.
- Orlov R.A., Experience of using microseismic noise to solve geological problems in the conditions of the platform (on the example of the Voronezh crystalline massif), *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geologiya* (Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology), 2011, no. 1, pp. 184-192.
- Orlov R.A. and Tregub A.I., Reflection of the voronezh crystalline massif in the seismic noises of neotectonic structure, *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 665-668.
- Safronich I.N., Nadezhka L.I., Some specific features of microseismic process in regional structural-tectonic elements of the Voronezh crystalline massif, *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 419, no. 1, pp. 294-297.
- Safronich I.N., Pivovarov S.P., Semenov A.E., Pivovarov S.V. Reflection of tectonic disturbances in the microseismic field (by the example of VCM), *Rezultaty kompleksnogo izucheniya sil'neishego Altaiskogo (Chuiskogo) zemletryaseniya 2003 goda, ego mesto v ryadu vazhneishih seismicheskikh sobitii XXI veka na territorii Rossii: materialy XXI nauchno-prakticheskoi Schukinskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* (The results of a comprehensive study of the strongest Altai (Chui) earthquake of 2003, its place among the most important seismic events of the twenty-first century in Russia: materials of the XXI scientific-practical Shchukin conference with international participation), Moscow: IFZ RAN, 2018, pp. 340-343.
- Seht M.I. and Wohlenberg J., Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1999, vol. 89, no. 1, pp. 250-259.
- Seroglazov R.R. *Osobennosti mikroseismicheskogo otklika geofizicheskoi sredy na dinamicheskoe vozdeistvie v usloviyah platformennykh oblastei* (Features of the microseismic response of the geophysical environment to dynamic effects in the conditions of platform areas), Moscow: IFZ RAN, 2003.
- Sherman S.I., Seminsky K.G., Borneyakov S.A., Buddo V.Yu., Lobatskaya R.M., Adamovich A.N., Truskov V.A., Babichev A.A., *Razlomoobrazovanie v lithosphere* (Faulting in the lithosphere). Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1991, vol. 1.
- Shvarev S.V., Nikonov A.A., Rodkin M.V. and Poleshchuk A.V., The active tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: parameters of paleoearthquakes estimated from bedrock and soft-sediment deformation features, *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 2018, vol. 90, pp. 257-273.
- Spivak A.A. Relaxation control and diagnostics of rock massifs, *Journal of Mining Science*, 1994, vol. 30, no. 5, pp. 418-436.
- Spivak A.A., Kishkina S.B., The use of microseismic background for the identification of active geotectonic structures and determination of geodynamic characteristics, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2004, vol. 40, no. 7, pp. 573-586.
- Spivak A.A., *Pripoverhnostnaya geofizika: uchebnoe posobie* (Subsurface Geophysics: A tutorial), Moscow: IDG RAN: MFTI, 2010.
- Spivak A.A., Spungin V.G., Determination of effective stresses and deformation features of block structures based on the registration of micro-oscillations of the geological environment, *Geoecologiya* (Geoecology), 1998, no. 4, pp. 71-88.
- Spivak A.A., Spungin V.G., Dubinya V.A., Operational assessment of the microseismic background using a mobile recording complex, *Izv. Phys. Solid Earth*, 1997, vol. 33, no. 1, pp. 79-83.
- Spungin V.G., Dubinya V.A., Ivanchenko G.N., Express diagnostics of the structure and geodynamics of the rock mass based on the analysis of microseismic vibrations, *Volcanology & Seismology*, 1997, vol. 18, no. 6, pp. 42-50.
- Spungin V.G., Zykov D.S., Microseismicity in local areas: The southeastern part of the Fennoscandian Shield, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 56-66.
- Tabulevich V.N., *Kompleksnye issledovaniya mikroseismicheskikh kolebanii* (Comprehensive studies of microseismic vibrations), Novosibirsk: Nauka, 1986.
- Tsukanov A.A., Gorbatikov A.V. Microseismic sounding method: Implications of anomalous Poisson ratio and evaluation of nonlinear distortions, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 548-558.