

УДК 550.34.012

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН НА ОСНОВЕ ПОВЕДЕНИЯ МИКРОСЕЙСМ

Лютюев В.А.

Институт геологии КНЦ УрО РАН, Сыктывкар, e-mail: VALutoev@geo.komisc.ru

Приведены результаты экспериментальных наблюдений за поведением микросейсмических колебаний в разломных зонах и вне их на структурах сочленения Волго-Уральской антеклизы, Мезенской синеклизы и Тиманского поднятия. Было замечено, что на некоторых участках разломных зон, перекрытых мощными четвертичными отложениями, наблюдается повышение амплитудного уровня микросейсм в частотном диапазоне от 6 до 12 Гц. Вне разломных зон «избыточный уровень» микросейсм не отмечается. Можно предположить, что в пределах тектонически активных зон весьма вероятны проявления сейсмического и микросейсмического характера. В первом случае это подтверждается регистрацией сейсмического события, произошедшего в течение одного из трех полевых сезонов и зарегистрированного при помощи программы ожидания сейсмического события – «Детектор STA/LTA». По уровню энергетической мощности это событие было отнесено к микроземлетрясению, для него были определены все основные сейсмологические параметры: магнитуда, эпицентральное расстояние, глубина очага, частотный спектр P- и S-волн и др. Во втором случае – для регистрации микросейсмических проявлений – были опробованы технологические возможности измерений уровня микросейсм на основе распределения частотных составляющих по спектральной плотности ($m/c^2/c$) и спектральной мощности ($m/c^2/Гц^{1/2}$). В результате на данной территории определены локальные участки, где возможны тектонические процессы, связанные с накоплением упругой сейсмической энергии, способные привести к количественным и качественным изменениям как в очаге землетрясения, так и в четвертичных рыхлых отложениях, залегающих в приповерхностном слое. Такие зоны в большинстве своем характеризуются по внешним признакам повышенной заболоченностью более протяженных участков вдоль направления разлома.

Ключевые слова: разломная зона, амплитудный уровень микросейсм, частотный интервал, микродеформация, напряжение, разрядка

DEGREE EVALUATION OF FREQUENCY ZONES ACTIVITY ON THE BASIS OF MICROSEISM CONDUCT

Lyutoev V.A.

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, e-mail: VALutoev@geo.komisc.ru

The results of experimental observations of the behavior of microseismic oscillations in the fault zones and outside them on the articulation structures of the Volga-Ural antecline, the Mezen syncline and the Timan elevation are presented. It was noted that in some areas of fault zones covered by thick quaternary deposits, an increase in the amplitude level of microseisms is observed in the frequency range from 6 to 12 Hz. Outside the fault zones, the «excess level» of microseisms is not observed. It can be assumed that seismic and microseismic manifestations are highly probable within tectonically active zones. In the first case, this is confirmed by the registration of a seismic event that occurred during one of the three field seasons, and registered with the aid of the seismic event waiting program, the STA/LTA detector. According to the level of energy power, this event was attributed to microearthquake, all the main seismological parameters were determined for it: magnitude, epicentral distance, focal depth, frequency spectrum of P and S waves, etc. In the second case, they were tested for recording microseismic manifestations technological capabilities of microseism level measurements based on the distribution of frequency components by spectral density ($m/s^2/s$) and spectral power ($m/s^2/Hz^{1/2}$). As a result, local areas have been identified in this area, where tectonic processes are possible associated with the accumulation of elastic seismic energy that can lead to quantitative and qualitative changes both in the earthquake source and in the Quaternary loose sediments in the subsurface layer. Such zones are mostly characterized by external signs of increased waterlogging over longer sections along the fault direction.

Keywords: fault zone, microseism amplitude level, frequency interval, microstrain, stress, discharge

Очаги землетрясений формируются в разломных зонах, однако эти зоны не всегда сейсмически активны, что связано с особенностями протекания тектонических процессов в земной коре. Сейсмичности свойственна цикличность – повторяемость землетрясений, где временной промежуток между ними может составлять от нескольких до тысячи и более лет. Микросейсмические события повторяются существенно чаще – от долей до нескольких секунд. Во всех этих циклах присутствует фаза накопления и фаза сброса сейсмической энергии. Накопленная энергия не всегда разрушает зоны

спайности плоскостей разрыва земной коры в связи с усиленной диссипацией энергии в окружающее пространство, снижающей уровень сил напряжения между геологическими блоками. Потери энергии вызываются силами неупругого сопротивления, которые в реальной среде весьма изменчивы. Более плотная геологическая среда может выдерживать большие силы внешнего воздействия, менее плотная – например, зона разлома – начинает проявлять себя в виде крипа или землетрясения. В скальных грунтах приобретенная энергия микросейсм лучше сохраняется, чем в рыхлых, в связи

с чем высокочастотные группы волн поглощаются сильнее в рыхлых грунтах. Это проявляется на спектрограмме сдвигом снижения амплитуды высокочастотной области волн в более низкочастотную. Для нашей территории преобладающий спектр сигнала смещается с 10–15 Гц в более низкочастотную область – 6–12 Гц. Такой же примерно интервал преобладающих частот мы наблюдаем и при регистрации местных землетрясений. Считаем, что данный вид исследований можно использовать для решения ряда практических задач в условиях платформенной сейсмичности при строительстве особо важных объектов, для чего следует изучать не только формирование очагов будущих землетрясений, но и разрастание зон проницаемости для флюидов в грунтовых толщах четвертичных отложений [1].

Целью данной работы является разработка вспомогательного метода для проведения детального сейсмического районирования платформенных территорий с редкой сейсмичностью. Он основывается на замерах уровней микросейсм в разломных зонах и вне их. Полученные спектры, характеризующие изменения амплитуд спектральной плотности и энергетического уровня спектральной мощности, позволят провести дифференциацию территории на участки с повышенным и с низким фоном микросейсм.

Материалы и методы исследований

В административном отношении район работ с пунктами наблюдений находится в юго-восточной части Республики Коми: Усть-Куломский р-н (Фроловск, Керчомья, Габово, Парма, Асыв-Вож, Озьяг, Югыдьяг, Белоборск) и Корткеросский р-н – Богородск.

В тектоническом плане пункты наблюдений располагаются в зоне сочленения Волго-Уральской антиклизы, Мезенской синеклизы и Тиманского поднятия. Ранее здесь геофизиками Л.А. Самойлюком и Б.П. Травниковым, на основе аэро- и космоснимков, карт аномального магнитного и гравитационного полей были выделены линияменты различного направления и кольцевые структуры, подтвержденные высокоточной аэромагнитной съемкой [2], а также сейсмологической характеристикой пород кристаллического фундамента и осадочного чехла [3, 4]. Авторы этих исследований предполагают, что здесь тектонические подвижки имеют в том числе взбросовый и взбросо-сдвиговый характер. Ожидаемая местная сейсмичность на данной территории по карте ОСР-97А и ОСР-97В отнесена по степени вероятности к зоне превышения сейсмической интенсивности землетрясений 5 баллов СШИ-17 в течение 50 лет – 10% и 5% соответственно. По карте ОСР-97С она отнесена по степени вероятности к зоне превышения сейсмической интенсивности землетрясений 6 баллов СШИ-17 в течение 50 лет – 1% [5]. В целом, разломные зоны характеризуются дискретностью, анизотропностью, гетерогенностью; релаксация избыточных напряжений, накопленных в тектонически активных регионах, происходит двумя способами: квазихрупкое разрушение горной породы (землетрясение) и пластическая деформация – непрерывное асейсмическое скольжение вдоль разлома (крип) [6].

Модель разломной зоны и развития разновидностей очагов землетрясений, их стереограмм можно представить в виде схематического рисунка (рис. 1).

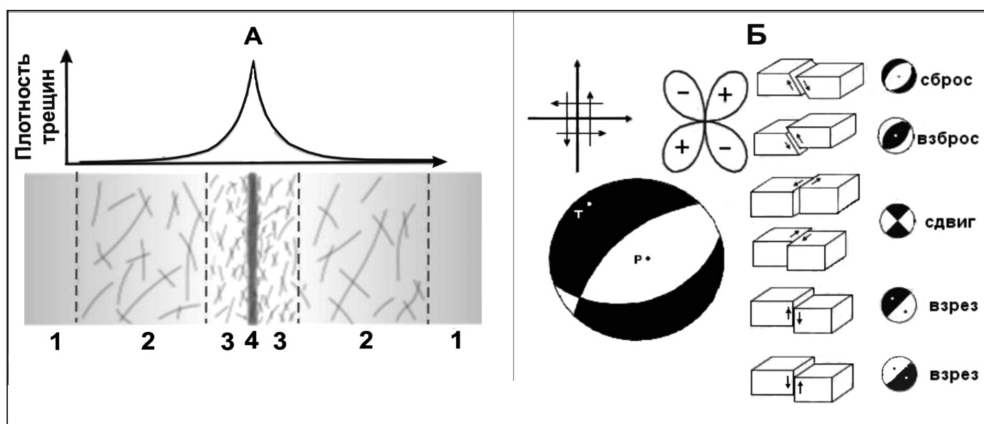


Рис. 1. А) модель плотностного распределения трещин в зоне разлома: 1 – целостная область пород, 2 – зона блокового дробления, 3 – разломная зона, 4 – зона главного смещения. Б) модели стереограмм механизмов развития очага: сброс, взброс, сдвиг, взрез

Ось сжатия Р находится в квадранте минусов, а ось растяжения Т – в квадранте плюсов. Оси напряжений характеризуются азимутом (Az) и углом их погружения относительно горизонта (PL). В зависимости от ориентации осей напряжений выделяется несколько режимов напряженного состояния земной коры. При горизонтальном растяжении и вертикальном сжатии создаются условия растяжения – сброс, при горизонтальном положении обеих осей – условия сдвига, и при вертикальном растяжении и горизонтальном сжатии – взброс.

Следует указать, что вышеприведенная разломная модель соответствует скальным и полускальным грунтам. В условиях перекрытия их мощными рыхлыми четвертичными отложениями на поверхности распространены линейно вытянутые обводненные локальные участки, с наибольшей степенью обводненности при осевой части разлома. Очаги типа «взброс» и «взброс – сдвиг» проявляют себя энергетически в 1,3 раза интенсивнее, чем при землетрясении, где очаг сформировался типа «сброс» или «сброс – сдвиг» [7], что распространено в большей степени в западной части борта Кировско-Кажимского авлакогена. Это следует из того, что в первом случае энергетический потенциал накопления выше, чем во втором, поэтому сейсмические толчки во временном промежутке формируются дольше, так как здесь присутствует эффект сжатия, и горные породы разрушаются при воздействии большей силы. При сбросах и сбросо-сдвигах в очаге преобладает эффект растяжения, в виду которого горные породы разрушаются при более низком энергетическом уровне, из-за чего сейсмические события могут проявляться чаще.

Для исследований данной территории были использованы следующие виды геофизической аппаратуры:

– электроразведочная станция «Электротест-С/USB» для работы в условиях промышленных помех и сложных заземлений. Разрешение – 0,01 мВ; Диапазон измерения – $(5 \times 10^{-3} \div 3,86 \times 10^3)$ Ом. Данная аппаратура использовалась для дифференциации рыхлых отложений по литологическому содержанию: пески, глины, суглинки, водоносыщенные грунты, – и прослеживания скального горизонта;

– сейсмическая станция ZetLab-048С с 24-разрядным АЦП. Трехкомпонентный пьезометрический датчик ускорения ВС-1313, Кпр. = 0,53 В/м/с², полоса регистрируемых частот (0,1–400) Гц. Частота

дискретизации от 50 до 1000 Гц. Данная аппаратура использовалась непосредственно для сейсмических измерений при различных режимах, позволяющих получать спектры и акселерограммы микросейсмических колебаний с разверткой сигналов 1D, 2 D, 3D в разломной зоне;

– метеостанция GEOS-11, точность работы: скорость ветра $\pm 2\%$, температура $\pm 0,5^\circ\text{C}$ при 25°C , влажность $\pm 2\%$ при 50%RH, атмосферное давление $\pm 1,5$ hPa (или 0,05 мм. рт. ст.) при 25°C и др. Данная аппаратура использовалась для предупреждения приращений фоновых значений от ветровых воздействий на сейсмодатчик.

Источниками микросейсм в полосе исследуемых частот могут быть различные колебательные процессы, как непосредственно в земной тверди, так и в воздушной и водной среде. Они излучают колебания с различными частотами и амплитудами. В зависимости от поставленной задачи и пути ее решения весь спектр микросейсм можно разделить на полезные сигналы – «сигнал», способствующий решению задач и «шум», мешающий их решению (рис. 2).

На рис. 2, а, в частотном диапазоне М1 приведена спектральная плотность ускорений штормовых микросейсм и удаленных слабых землетрясений, кроме них здесь же фиксируются шумы, инициированные атмосферными и гидродинамическими воздействиями УГВ. В диапазоне частот М2 фиксируются местные землетрясения и микроземлетрясения, здесь к шумам можно отнести ветровое воздействие в приповерхностном слое земли и техногенное влияние. Этот «шум» проявляет себя довольно быстрым ростом амплитуд в полосе частот 5–20 Гц и одновременно быстрым снижением при его ослаблении (рис. 2, в). Микросейсм, возникающие в результате микроциклов сжатия-растяжения и сдвига в разломных зонах, а также при криповых смещениях, мы отнесли к типу – «сигнал» (рис. 2, г). Микросейсм, которые в общем спектре колебаний совпадали в частотном интервале, затрагивая исследуемую область «сигнал», были так же названы – «шум». Например, ветровые «шумы» в зависимости от силы ветра возбуждают различные частоты, в том числе и совпадающие с «сигналом», в результате которого резко увеличиваются амплитудные значения в условиях расширения полосы частот (рис. 2, а, в, г). Для снятия его влияния применялась фильтрация, которая частично позволяет срезать область частот «шум». Однако при совпадении

«шума» и «сигнала» по частоте следует провести запись в условиях полного отсутствия полосы частот «шум», для этого необходимо, чтобы «сигнал» принял минимальное значение по уровню и приобрел максимально правильную устойчиво-симметричную форму (рис. 2, б, г). В связи с этим следует произвести несколько записей в условиях отсутствия ветрового воздействия, которое определяется метеостанцией, находящейся непосредственно в точке наблюдения, одновременно при достаточной удаленности от населенных пунктов, несущих с собой техногенные компоненты «шум».

Результаты исследования и их обсуждение

Как известно, сейсмические события проявляются в разломах, представляющих собой многокилометровые линейные зоны, которые хорошо просматриваются с высоты на аэро- и космоснимках. Что касается выявления их активности в современное время, то здесь возникают определенные трудности в подборе методик и критериев. В рамках уточнения схемы детального сейсмического районирования юго-восточной части Республики Коми были опробованы технологические возможности измерений уровня микросейсм на основе распределе-

ния частотных составляющих по спектральной плотности, $m/c^2/c$ и спектральной мощности $(m/c^2)/Гц^{1/2}$ (рис. 3).

В результате было выявлено, что в разломной зоне, в пункте приема микросейсм, наблюдается более высокоамплитудный спектр тренда колебаний, чем вне ее.

Данное явление можно объяснить с позиций квазихрупких микроразрушений в плоскости разрыва. В условиях более низкого акустического импеданса будет происходить повышение амплитуд и частот, т.е. спектр в этом случае смещается правее, в область шумов M2. С другой стороны, при повышенном декременте затухания среды в условиях пластических деформаций заметно снижаются амплитуда и частота сейсмической волны, здесь частотный интервал смещается с правой части в левую – M1 относительно всего спектра регистрации. Следовательно, в разломной зоне, в пункте приема сейсмических волн, мы будем регистрировать в какой-то момент времени более широкий спектр микросейсмических колебаний одновременно с увеличенным его амплитудным уровнем, чем в условиях более однородной среды. Всего было исследовано семь профилей с шагом наблюдений 500 м, каждый профиль состоял не менее чем из 10 точек, приведена упрощенная тектоническая схема района работ (рис. 4).

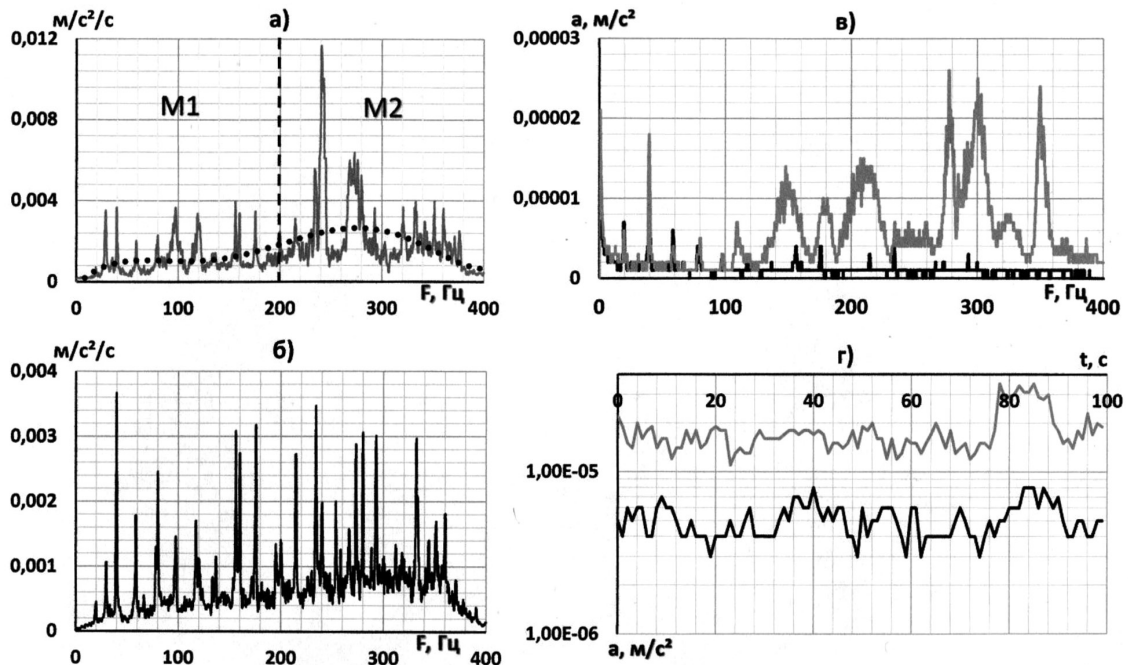


Рис. 2. Амплитудно-частотные уровни «шум» и «сигнал»: а – спектральная плотность наведенного «шум»; б – спектральная плотность «сигнал»; в – срез по частоте в условиях наведенного «шум» и «сигнал»; г – срез по времени в условиях наведенного «шум» и «сигнал». Примечание: серый цвет – кривая «шум»; черный цвет – кривая «сигнал»

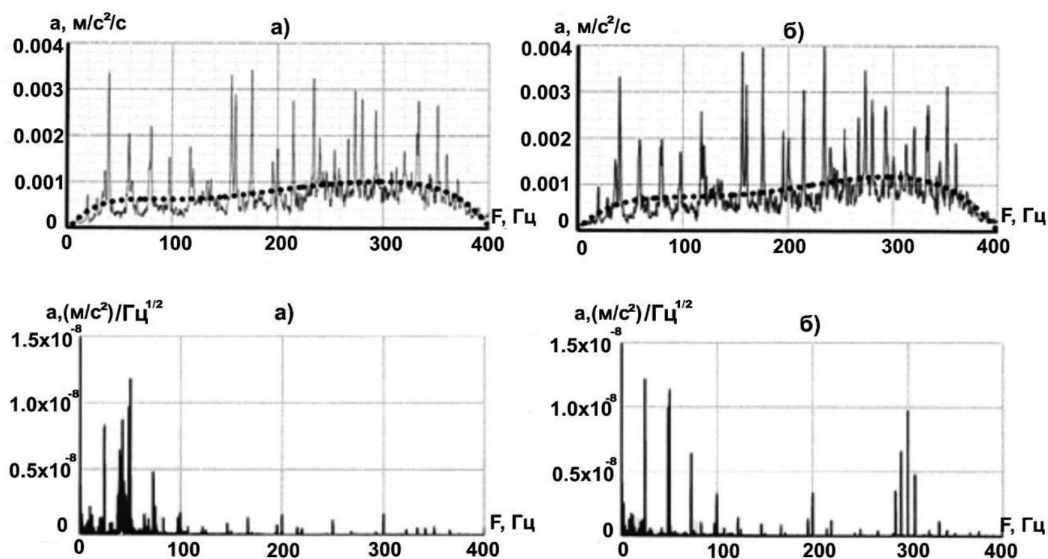


Рис. 3. Поведение микросейсм в разломной зоне по спектральной плотности ($m/c^2/c$) и спектральной мощности ($m/c^2/Гц^{1/2}$): а – вне разлома, б – вблизи разлома

Одновременно здесь же проводились замеры объемной активности Ra-222, которые показывали в разломных зонах ее повышенное содержание – до нескольких сот Бк/м³ и выше, а в неразломных зонах – существенно ниже.

Что касается регистрации сейсмических событий, то за три полевых сезона было зарегистрировано всего одно землетрясение, относящееся по уровню энергетической мощи скорее всего к микроземлетрясению, чем к слабому землетрясению (рис. 5). Время в очаге произошедшего микросейсмического события 7.06.2016 (14h19m54.7s).

В результате обработки акселерограммы этого события и привлечения региональных сейсмических данных ГСЗ [8] были определены его сейсмологические параметры. Для определения гипоцентрального расстояния была использована формула

$$ts - tp = \frac{\Delta}{V_s} + \frac{\Delta}{V_p},$$

где ts – время прихода поперечной волны, tp – время прихода продольной волны, Δ – эпицентральное расстояние, $V_p = 6,40$ км/с – средняя скорость Р волны по всему разрезу, $V_s = 3,75$ км/с – средняя скорость S волны по всему разрезу, $ts - tp$ – время отставания S волны от Р волны (на этом расстоянии составила 1,95 с), глубина очага определялась по фазе продольных волн – p и p' , где p – начало вступления волны, распространяющейся из гипоцентра, а p' – первая преломленная волна, при скорости 6,7 км/с, тогда время ее

вступления будет 1,76 с, что дает расчетную глубину $H \approx 12$ км, гипоцентральное расстояние с учетом глубины очага 12 км составила $\Delta_g = 17,66$ км, тогда эпицентральное расстояние $\Delta_z = 12,94$ км, М – магнитуда сотрясения по максимальной амплитуде смещения S волны составила 1,17 единиц. Преобладающий период Р волны на спектре составил – 0,09 с или 11,0 Гц, S волны – 0,13 с или 7,7 Гц. По компонентам величин амплитуд ускорений (a_x, a_y, a_z) было определено азимутальное направление $Az = 350^\circ$ относительно п.н. Габова ($60^\circ 59' 08.41''$ N; $53^\circ 44' 23.72''$ E) с последующим определением координат ($61^\circ 05' 48.65''$ N; $53^\circ 42' 18.30''$ E). В тектоническом плане данное микросейсмическое событие относится к Вочско-Лупьянской ступени, перекрытой четвертичными отложениями (IV_1^1), в нижнепермских слоях она выделяется в виде слабо-выпуклой субгоризонтальной поверхности, полого (1–2 м/км) погружающейся к юго-западу и северо-западу от верховьев р. Вочь.

Выводы

В результате проведенных сейсмических исследований в разломных и приразломных зонах, находящихся в юго-восточной части Республики Коми, а именно в зоне сочленения Волго-Уральской антеклизы, затрагивающей геологические структуры различного порядка: Вычегодский прогиб, Кировско-Кажимский прогиб, Тиманская гряда и Коми-Пермяцкий свод – было определено:

– с помощью программы ожидания сейсмического события «Детектор STA/

ЛТА» было зафиксировано местное микроземлетрясение с волновой картиной акселерограммы, присущей для очага «взброс»;

– сейсмические наблюдения показали, что на основе инструментальных измерений можно определить отличительный характер изменения спектральной плотности и энергетической мощности потока микросейсм в разломных зонах и за его пределами;

– в разломных зонах спектральная плотность проявляет себя в виде устойчивого повышенного фона дискретных составляющих, относящихся к типу микросейсм «сигнал»; если «сигнал» неустойчив, меняет свои дискретные составляющие, то эти микросейсмы переходят в разряд сигнала «шум»;

– для более успешного разделения микросейсм «сигнал» и «шум» в условиях регистрации энергетической мощности потока микросейсм необходимо использовать временные интервалы затишья экзогенных и техногенных шумов;

– микросейсм в спектральной плотности и энергетической мощности потока формы «сигнал» резко выделяются своим постоянством во времени. Такой «сигнал», скорее всего, отвечает законам распространения сейсмической волны в реальных геологических средах;

– частотный диапазон измерения микросейсм платформенных территорий тектонического происхождения составляет 6–12 Гц.

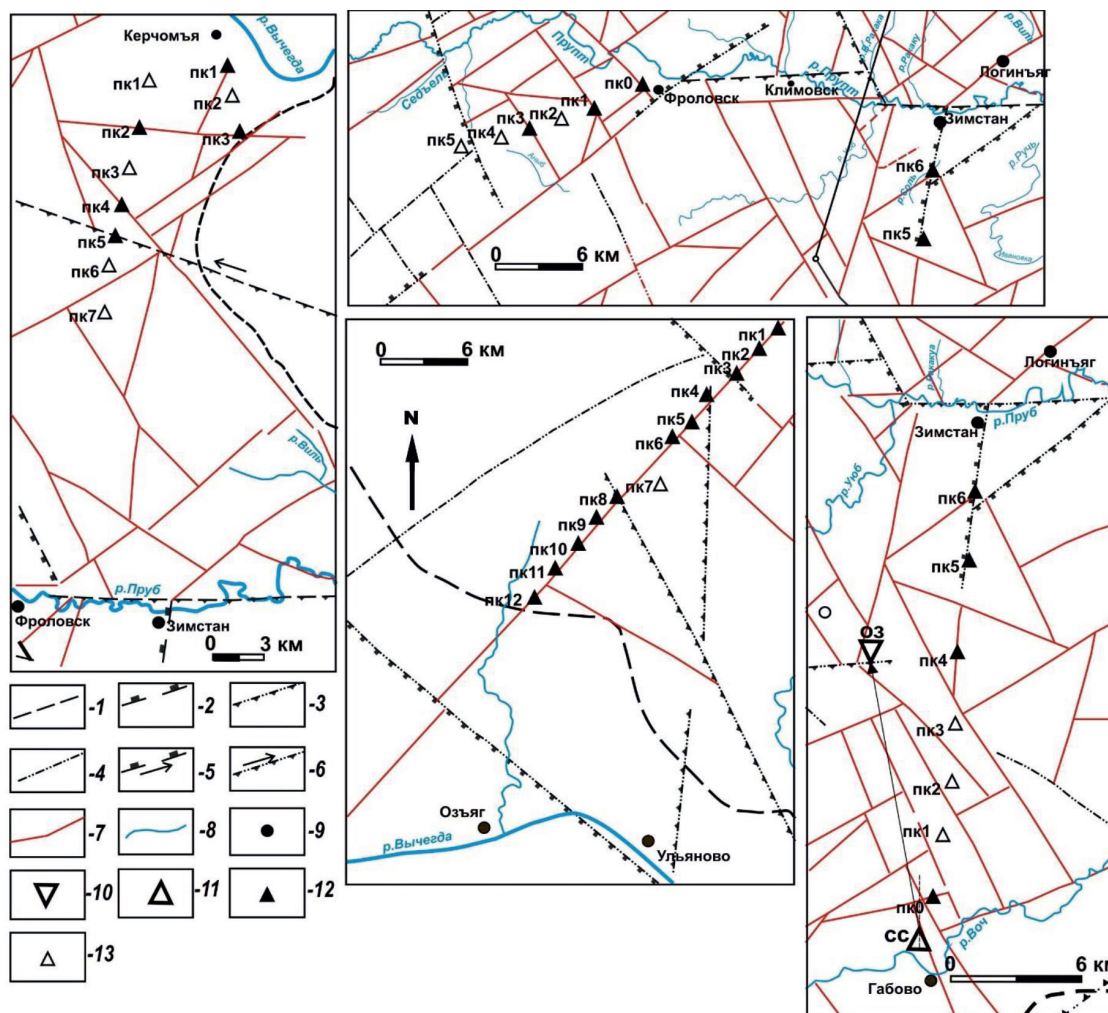


Рис. 4. Тектоническая схема района работ и пунктов измерений уровня микросейсм на участках разломных и вне разломных зон: 1 – границы стратиграфических подразделений, 2 – сбросы, 3 – взбросы, 4 – структуры неясного происхождения, 5 – сдвиго-взбросы, 6 – сдвиго-сбросы, 7 – линияменты, определенные на основе космо- и аэрофотоматериалов, подтвержденные высокоточной аэромагнитной съемкой, 8 – речная сеть, 9 – населенные пункты, 10 – местоположение очага микроземлетрясения, 11 – пункт регистрации микроземлетрясения, 12 – микроколебания выше фоновых, 13 – фоновые микроколебания

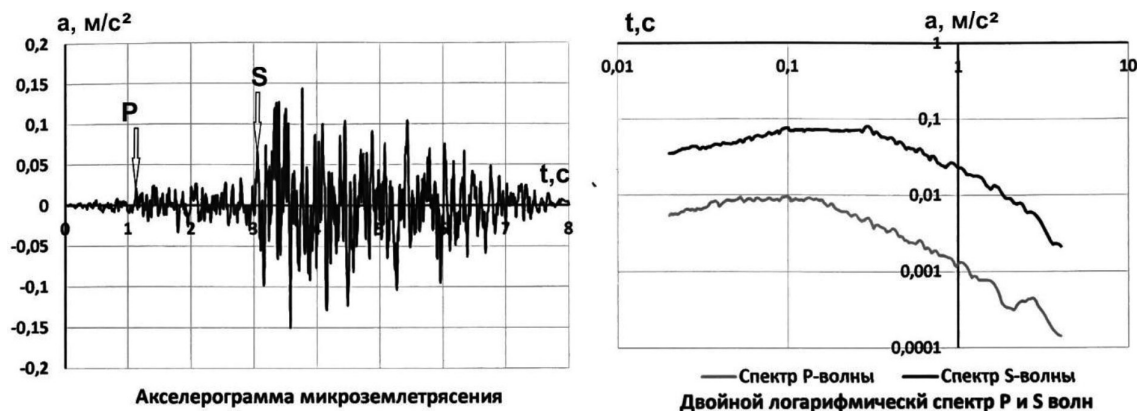


Рис. 5. Акселерограмма микроземлетрясения и его двойной логарифмический спектр

Недостатком является сложность дифференциации типов «сигнал» и «шум», а также отсутствие количественной характеристики временных условий прогноза формирования очага землетрясения. Однако мы считаем, что вероятностный прогноз вполне обоснован в рамках детального сейсмического районирования.

Список литературы / References

1. Джурик В.И., Серебренников С.П., Ескин А.Ю., Брыжак Е.В. Обследование тектонических нарушений по трассе газопровода методом вертикальных электрических зондирований // Успехи современного естествознания. 2016. № 12–2. С. 380–386.
2. Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Eskin A. Yu., Bryzhak E.V. Inspection of tectonic disturbances along the pipeline route by the method of vertical electrical sounding // Advances in modern science. 2016. № 12–2. P. 380–386 (in Russian).
3. Аэрогеологическая карта междуречья Вычегды и Камы масштаба 1:200000. Серии Тиманская, Пермская, Листы Р-39-XXIV (Усть-Кулом), XXIX (Лопыдино), XXX (В. Вочь, Лупья), Р-40-XXV (Н. Вочь). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2001. 130 с.
4. Aero geological map of Entre Rios of Vychehda and Kama of scale 1:200000. Serii Timanskaya, Permskaya, Listy` R-39-XXIV (Ust`-Kulom), XXIX (Lopy`dino), XXX (V. Voch`, Lup`ya), R-40-XXV (N. Voch`). Ob`yasnitel'naya zapiska. SPb.: Izd-vo SPb kartfabriki VSEGEI, 2001. 130 p. (in Russian).
5. Белякова Л.Т., Богацкий В.И. и др. Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна. Киров: ОАО «Кировская областная типография», 2008. 288 с.
6. Belyakova L.T., Bogatsky V.I. and others. The foundation of the Timan-Pechora oil and gas basin. Kirov: JSC Kirov Regional Printing House, 2008. 288 p. (in Russian).
7. Неганов В.М. Сейсмологическая интерпретация геофизических материалов Среднего Приуралья и перспективы дальнейших исследований на нефть и газ. Пермь: Пермский ун-т, 2010. 248 с.
8. Neganov V.M. Seismological interpretation of geophysical materials of the Middle Urals and prospects for further research on oil and gas. Perm: Perm University, 2010. 248 p. (in Russian).
9. СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах СНиП-7-81* (актуализированного СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011)) (с Изменением № 1). М., 2014. 88 с.
10. Макаров В.П., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 1. С. 5–26.
11. Makarov V.P., Eremin M.O. Fracture model of brittle and quasi-brittle materials and geomeidia // Physical mezomechanika. 2013. T.16. № 1 P. 5–26. (in Russian).
12. СП XXX. 1325800.2017 Детальное сейсмическое районирование и микрорайонирование для территориального планирования. М., 2017. 28 с.
13. Булин Н.К., Егоркин А.В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М.: Центр ГЕОН, 2000. 194 с.
14. Bulin N.K., Egorkin A.V. Regional forecast of the oil and gas potential of the subsoil by deep seismic criteria. M.: Center GEON, 2000. 194 p. (in Russian).