

УДК 550.34.

Динамические параметры слабых землетрясений юго-восточного склона Балтийского щита

© 2022 г. Н.М. Панас, Б.А. Ассиновская

ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 22.02.2022 г.

Аннотация. Динамические параметры очагов землетрясений характеризуют особенности процесса деструкции сейсмогенной среды. Эти параметры определены в мире для землетрясений разных магнитуд и разного генеза. Для слабоактивного в сейсмическом отношении региона Фенноскандии очаговые характеристики землетрясений охарактеризованы в 1990-е гг. по аналоговым записям. В данной работе получена сводка указанных величин для слабых землетрясений с $ML=1-2$, имевших место на юго-восточном склоне Фенноскандинавского щита в 2009–2019 гг. для двух роёв землетрясений, различных по происхождению – тектонического Коуволы и техногенного Эркия. Работа проводилась по данным Санкт-Петербургской цифровой сейсмической сети. В процессе исследований по сейсмограммам сети построены спектры прямых волн Sg, рассчитаны значения радиуса очага, сейсмического момента и падения (снятия) напряжений для 15 землетрясений тектонического и техногенного характера. Полученные результаты хоть и имеют разброс в величинах, но не сильно отличаются от среднемировых значений. Тем не менее оказалось, что сейсмический момент и падение напряжения значимо зависят от генезиса событий.

Ключевые слова: слабое землетрясение, локальная магнитуда, сейсмический момент, падение напряжения, радиус очага, Фенноскандия, Выборгская интрузия гранитов рапакиви, сейсмический рой.

Для цитирования: Панас Н.М., Ассиновская Б.А. Динамические параметры слабых землетрясений восточного склона Балтийского щита // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 65–78. DOI: [10.35540/2686-7907.2022.4.05](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.4.05). – EDN: AFPGFJ

Введение

Динамические или очаговые параметры очагов землетрясений – сейсмические моменты M_0 , радиусы r , величины падения напряжения $\Delta\sigma$ – характеризуют особенности процесса деструкции сейсмогенной среды. Эти параметры в большом количестве определены повсеместно в мире для землетрясений различного магнитудного уровня.

Целью этой работы является оценка динамических параметров слабых тектонических землетрясений юго-востока Фенноскандинавского региона, полученные по современным цифровым данным. В работе получена небольшая сводка указанных величин двух роёв землетрясений с $ML=1-2$, имевших место на юго-восточном склоне Фенноскандинавского щита в 2009–2019 гг. в пределах Выборгской интрузии рапакиви. Интересно также было сравнить параметры чисто тектонических событий (Коуволы) и тех-

ногенных (Эркия), возникших в районе интенсивной добычи строительного камня.

Очень давно региональные очаговые параметры определялись по аналоговым записям землетрясений региона в целом [Kim et al., 1989], а также событий локальной области размещения финской атомной станции Ловийса [Saari, 1991]. Известно также исследование из области возникновения роя Меллоу 1978 г. [Bungum et al., 1982] на северо-западе Норвегии, но там иные сеймотектонические условия.

Теоретические основы метода расчётов были заложены в работах [Ризниченко, 1976; Brune, 1970; 1971]. Важным выводом теоретических работ стало то, что для оценочных расчётов скалярного момента и радиуса очага достаточно определить по сейсмограммам всего два параметра: частоту спада спектра и уровень предельной спектральной плотности смещения на низких частотах. При этом прочие параметры (плотность ρ , скорость поперечных волн V_s) характеризуют

макрообъём массива в земной коре, и, как правило, считаются одинаковыми для всех событий [Sycheva, Bogomolov, 2014]. Этот общепринятый подход позволяет определить динамические параметры во всех случаях, если имеются качественные исходные данные (цифровые записи сейсмограмм). В настоящей работе расчёт очаговых параметров землетрясений проводился по данным Пулковской цифровой сети. Сеть включает пять сейсмостанций, установленных на территории Ленинградской области и Карелии. Сеть обеспечивает регистрацию локальной сейсмичности внутри области $\varphi=59-62^{\circ}\text{N}$, $\lambda=24-32^{\circ}\text{E}$. Общие данные об изучаемых землетрясениях представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Параметры землетрясений роя Коуволла

№	Дата, дд.мм.гггг	φ , °N	λ , °E	H , км	ML
1	13.10.2011	61.13	27.02	5	1.8
2	16.12.2014	61.06	27.33	1	1.9
3	16.02.2015	60.83	26.80	2	1.0
4	17.06.2015	60.83	26.82	2	1.9
5	01.09.2015	60.48	26.95	1.5	1.0
6	04.09.2015	60.91	26.71	2	0.9
7	28.04.2019	60.95	26.91	1.5	2.0
8	01.06.2019	60.90	26.72	0.5	1.3

Таблица 2. Параметры землетрясений роя Эркияля

№	Дата, время дд.мм.гггг чч.мм	φ , °N	λ , °E	H , км	ML
1	06.03.2014	60.75	28.82	2	1.1
2	07.10.2015	61.04	29.03	2	2.1
3	18.12.2016 00:20	60.75	28.82	2	2.2
4	18.12.2016 00:30	60.74	28.84	1	1.5
5	18.12.2016 00:54	60.73	28.85	2	0.8
6	18.12.2016 02:35	60.74	28.84	1	1.2
7	06.05.2018	60.82	29.04	2	1.4

Геология и сейсмичность

Выборгский батолит рапакиви (рис. 1) занимает площадь более 20000 км² в Юго-Восточной Финляндии и российском Карельском перешейке. Батолит возрастом 1.65–1.63 млрд лет, прорывающий коренные породы палеопротерозоя, сформировался в процессе свекофеннского орогенеза между 1.9 и 1.8 млрд лет. Выборгская интрузия протягивается с севера на юг на 180 км, с запада на восток – от 60 до 130 км.

Выборгский батолит характеризуется относительно низким уровнем сейсмической активности

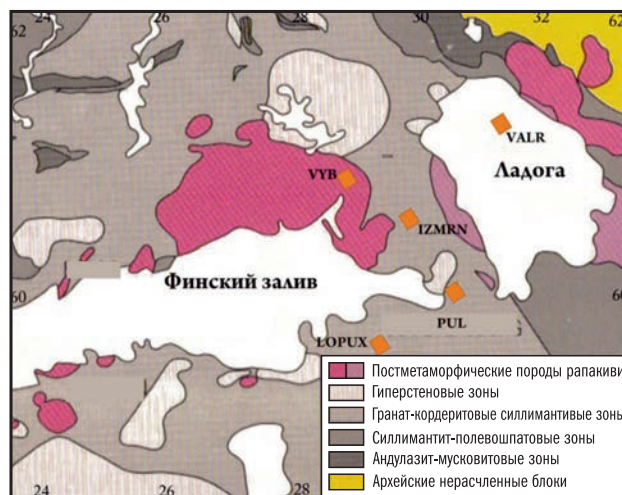


Рис. 1. Геологическая схема района исследования [Härme, 1980].

Оранжевые ромбы – российские сейсмические станции

(рис. 2), однако он имеет длительную сейсмическую историю [Renquist, 1930; Ahjos, Uski, 1992]. Продолжительность отдельных роёв варьирует от нескольких дней до нескольких лет, временной разрыв между последними роями составляет около 50 лет. Самый известный рой произошёл в Лапинъярви в начале 1950-х гг. Всего в период с августа 1951 г. по октябрь 1956 г. было зарегистрировано 23 события, большинство из которых были двойными или множественными толчками.

Самое сильное землетрясение в этом рою произошло в апреле 1952 г. с $M=3.1$, остальные события имеют макросейсмические магнитуды M от 2.1 до 2.6. Более короткие периоды роевой активности наблюдались также в Виролахти зимой 1899–1900 гг. и в Пюхтяя в 1751 и 1752 гг. 10 мая 2003 г. сеть финских сейсмографов зафиксировала десять землетрясений в Аньяланкоски, в 40 км к северо-востоку от Лапинъярви. С мая по октябрь 2003 г. произошло 18 ($ML=0.6-2.1$) идентичных по форме мелкофокусных землетрясений. Следующий рой произошёл в окрестностях города Коуволла в декабре 2011 г., зарегистрирован инструментально. В Коуволла рой насчитывал уже более чем 150 землетрясений в интервале ML от 0.4 до 2.8 с аналогичными очаговыми параметрами [Smedberg et al., 2012].

В данной работе исследованы сейсмические события (табл. 1 и 2, рис. 3 и 4) из двух роёв – Коуволла в Финляндии [Smedberg et al., 2012] и Российского Эркияля, возникшего недавно в районе одноимённого карьера на территории Карельского перешейка [Assinovskaya et al., 2019].

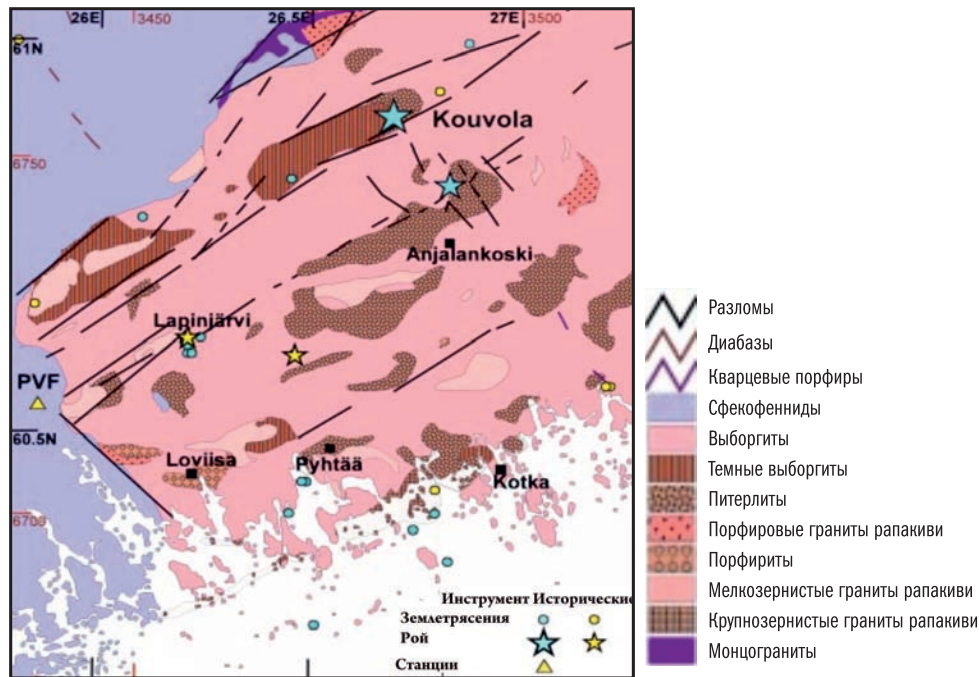


Рис. 2. Детальная структура Выборгской интрузии рапакиви (западная часть) и сейсмичность [Smedberg et al., 2012]



Рис. 3. Эпицентры землетрясений, для которых рассчитывались очаговые параметры.

Кружками обозначены события из роя Эркия (Россия), квадратами – из роя Куувола (Финляндия)

Геологическое строение массива в районе роёв весьма сложное – в нём присутствуют вещественные, текстурные и структурные неоднородности – граниты рапакиви представлены несколькими петрографическими разновидностями – выборгитами, питерлитами, а также крупноовоидными порфиroidными образованиями.

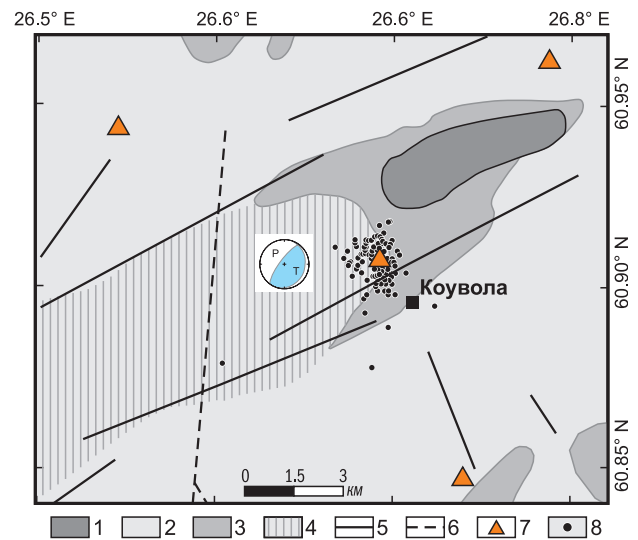


Рис. 4. Геологическая обстановка в районе роя Куувола [Smedberg et al., 2012].

1 – зернистые рапакиви граниты; 2 – выборгиты; 3 – питерлиты; 4 – тёмные выборгиты; 5 – линеаменты; 6 – разломы; 7 – временные сейсмические станции; 8 – землетрясения. Бело-голубым цветом показан комплексный механизм очага всего роя

Во многих местах, особенно на западе, в том числе в очаговых зонах и вокруг, имеются диагональные структуры и жильные образования северо-западного и меридионального простираний, состоящие из так называемых тёмных

выборгитов, порфириновых гранитов и др. Так, скопление очагов Коуволла приурочено к тёмным выборгитам и разлому северо-западного простирания (рис. 4). Это подтверждается механизмом очага роя Коуволла – активным линейamentом следует считать восток–северо-восток – запад–юго-запад, взбросо-сдвиговая подвижка произошла по вертикальному нарушению данного направления. Протяжённость зоны – 1 км [Smedberg et al., 2012]. Можно отметить, что ранее упомянутый рой Аньяланкоски [Uski et al., 2006] приурочен к питерлитам (рис. 2). Массив разбит здесь многочисленными субпараллельными и ортогональными тектоническими нарушениями, в основном, северо-западного и субмеридионального простираний (рис. 2).

Рой Эркия из 32 землетрясений с $ML = (-0.3) - 2.1$ возник на восточной границе Выборгской интрузии гранитов рапакиви на глубине 2 км и, судя по карте (рис. 5), геологическая структура тектонически здесь также сложная, присутствуют разломы северо-западной направленности, жилы пегматито-аплитового и чисто кварцевого состава. Ориентация разломов соответствует механизму очага события 18 декабря 2016 г. в 00^h20^m , характеризующегося взбросо-сдвиговой подвижкой по плоскости с падением 75° и северо-западным простиранием плоскости разрыва 308° . Геодинамика области определяется преобладающим напряжением сжатия северо-западного направления и субмеридиональным близвертикальным растяжением [Assinovskaya et al., 2019]. Установлена приуроченность выявленной сейсмогенной зоны длиной 4 км как к разлому, ограничивающему Выборгскую интрузию гранитов рапакиви с востока, так и, возможно, к новому нарушению, возникшему в районе длительно и интенсивно функционирующего карьера «Эркия».

Исходные данные и расчёт динамических очаговых параметров

Расчёт параметров применим для слабых землетрясений, если имеются качественные исходные сейсмические записи [Габсатарова и др., 2022; Баранов и др., 2022; Сеть ..., 2022].

Станции Пулковской сети оборудованы короткопериодными сейсмометрами GS-13 или CM-3KB, а также цифровыми регистраторами – 16-разрядными SDAS или 24-разрядными UGRA (частота опросов – $40-50 \text{ отс/с}$, чувствительность – $2.00 \cdot 10^{-9} - 9.68 \cdot 10^{-10} \text{ (м/с)/отс}$). Условия размещения сейсмических станций следующие: станция «Валаам» (VALR) установлена

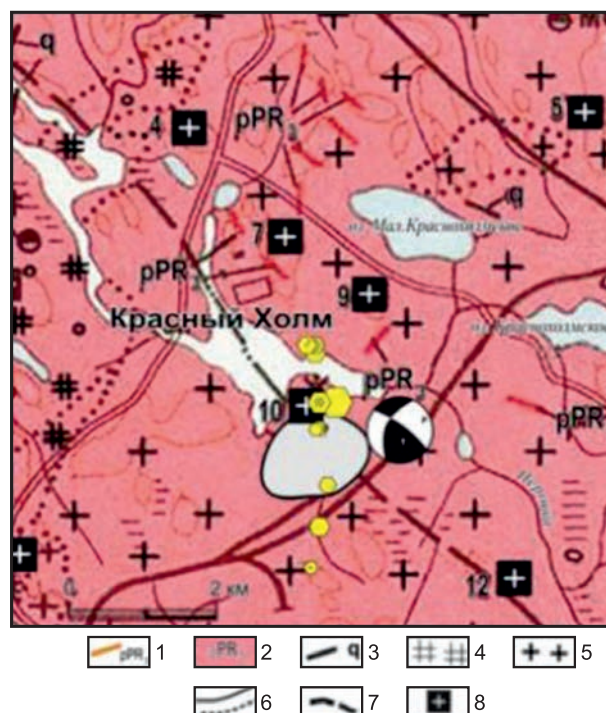


Рис. 5. Тектоническое положение роя Эркия на геологической карте [Государственная ..., 2022].

1 – позднепротерозойские интрузии; 2 – граниты рапакиви (Выборгский массив); 3 – кварцевые жилы; 4 – граниты рапакиви порфирировидные; 5 – выборгиты; 6 – границы между разновозрастными образованиями; 7 – разломы; 8 – месторождения полезных ископаемых. Жёлтые шестиугольники – очаги землетрясений, для наиболее сильного события 18 декабря в 00^h20^m показан механизм очага. Серая область – примерное положение карьера «Эркия»

на кристаллических породах – габбродолеритах, «Выборг» (VYBR) – на гранитах, «Красное озеро» (IZMRN) – на супесях, суглинках (первые метры), «Лопухинка» (LOPUX) – на известняках.

Историческая станция «Пулково» является широкополосной и слабо чувствительной, она не регистрирует слабые местные события, и её данные используют только для обработки сильных далёких землетрясений.

Дальнейшая обработка записей осуществляется в центре с помощью программы WSG [Акимов, Красилов, 2020].

Как видно из рис. 6, регистрирующая аппаратура установлена в основном в благоприятных условиях на жёстких грунтах, кроме станции «Красное озеро», уровень шумов достаточно низкий (рис. 6), что обуславливает высокое качество получаемых данных.

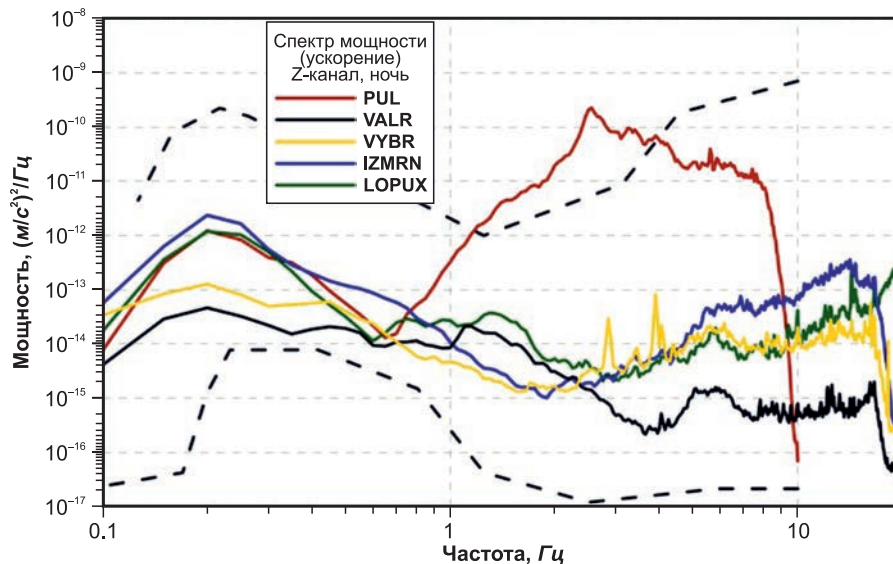


Рис. 6. Спектры мощности ночного шума на вертикальной компоненте сейсмических станций Санкт-Петербургской сети в сравнении с глобальными моделями его низкого (Low Noise Models (NLNM)) и высокого (High Noise Models (NHNM)) уровней, показанных чёрными пунктирными кривыми [New Manual ..., 2012]. Составил В.В. Карпинский

Динамические параметры рассчитаны для восьми землетрясений роя Коуволла и семи событий скопления Эркия. Данные для расчётов представлены в табл. 1 и 2, результаты – в табл. 3 и 4. События Коуволла имели магнитуды ML в интервале 1–2 и глубины очагов 0.5–5 км [Smedberg et al., 2012]. Землетрясения из района Эркия характеризовались параметрами магнитуды 0.8–2.2 и возникли на глубинах 1–2 км [Assinovskaya et al., 2019].

Методика оценки сейсмического момента, радиуса очага, падения напряжения описана во многих работах [Ризниченко, 1976; Brune, 1970; 1971; Sycheva, Bogomolov, 2014; 2016]. Расчёт проводился с использованием приведённых там формул.

Выражение для расчёта скалярного момента по амплитуде спектра смещения Ω_0 вытекает из решений волновых уравнений для сферически расходящихся сейсмических волн. Это выражение записывается в форме:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho r V_s^3 \Omega_0}{\Psi}, \quad (1)$$

где $\Psi=0.64$ – фактор направленности излучения из очага [Ризниченко, 1976], Ω_0 – амплитуда спектра смещения в области низких частот из сейсмограммы, плотность горных пород в области очага $\rho=2.7 \text{ г/см}^3$, скорость поперечных волн $V_s=3.64 \text{ км/с}$ для Фенноскандии, гипоцентрального расстояние:

$$R=(h^2+\Delta^2)^{1/2}. \quad (2)$$

Считается, что формула справедлива для любых расстояний от источника, однако наибольшая точность получается для относительно небольших расстояний R , когда значения ρ и V_s в самом очаге и вокруг можно считать одинаковыми. При неоднородном строении среды, как под станцией, так и на пути волны от очага к станции, учитывают её влияние на стационарный спектр среды. Влияние среды от очага до станции зависит от частоты и расстояния – геометрического расхождения и поглощения энергии в среде (фактора добротности Q). Добротность аппроксимируется степенной функцией $Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha$ с численными значениями коэффициентов Q_0 и α : добротность $Q_0=440$, и показатель зависимости добротности от частоты $\alpha=0.7$ для Фенноскандинавского щита [Kwamme et al., 1995]. В случае, когда кора – кристаллического типа, а расстояния невелики, среду можно считать однородной.

По формуле:

$$A_i(f,R) \cdot \exp(-\pi f R / Q V_s) = A_j(f,R), \quad (3)$$

где $A_j(f,R)$ – очаговая амплитуда, $A_i(f,R)$ – стационарная амплитуда, для получения которой была проведена оценка влияния на спектральную амплитуду волн каждого события добротности и поглощения для разных частот и из известной стационарной амплитуды $A_i(f,R)$ получена очаговая характеристика $A_j(f,R)$ (табл. 3, 4).

Следующий параметр – радиус сейсмического очага – определяется формулой:

$$r = \frac{2.34V_s}{2\pi f_0}, \quad (4)$$

где на сейсмограмме f_0 – угловая частота смещения, определяемая по изменению (излому) характерного для низких частот линейного тренда спектральной плотности или максимум спектра скорости движения грунта.

Для оценки падения напряжения для землетрясения с моментом M_0 можно использовать выражение, в котором значение коэффициен-

та пропорциональности между $\Delta\sigma$ и отношением M_0/r^3 выбрано в соответствии с [Brune, 1970; 1971] для модели поверхности разрыва в форме круга с радиусом r .

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3}. \quad (5)$$

В процессе исследований по сейсмограммам событий были построены спектры прямых волн S_g , рассчитаны указанные выше параметры (табл. 3, 4). Сейсмограммы показаны на рис. 7а, б и выглядят следующим образом, очевиден низкий уровень шумов.

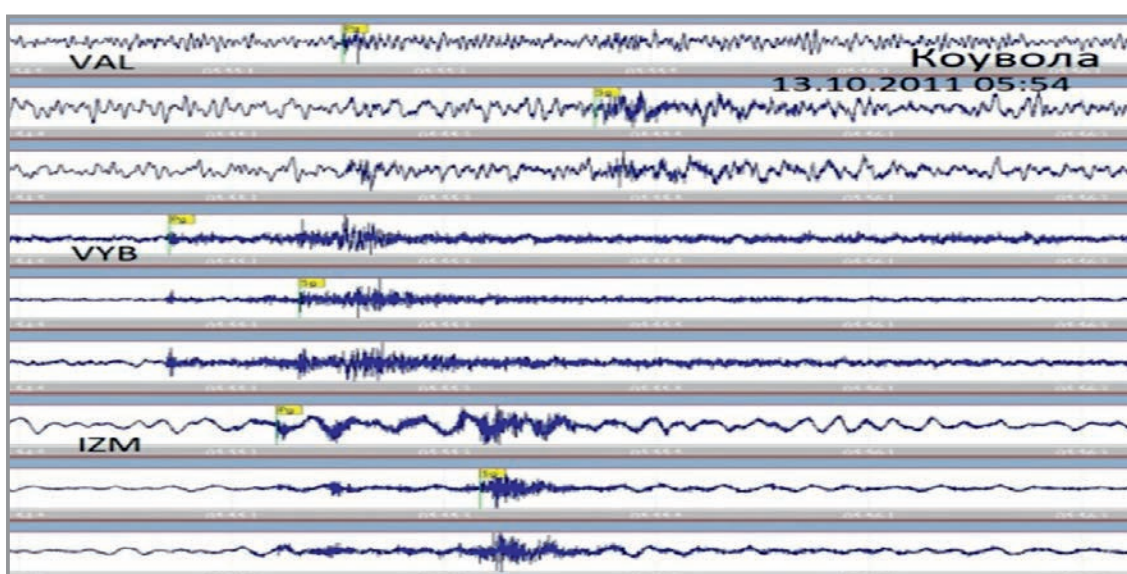


Рис. 7а. Пример сейсмограммы, рой Коуволла, событие 13.10.2011 г.

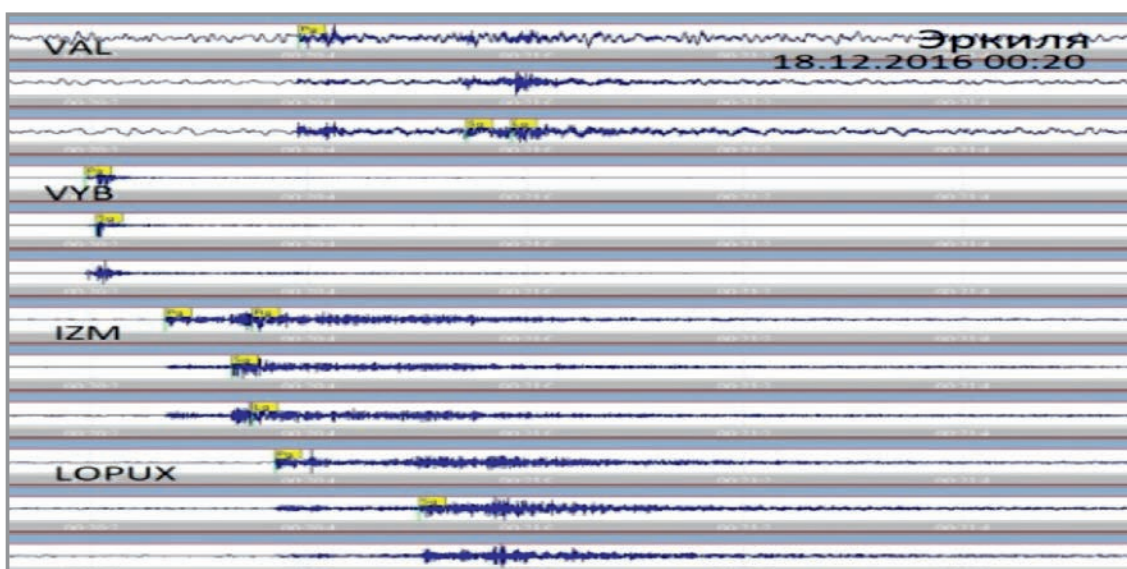


Рис. 7б. Пример сейсмограммы, рой Эркия, событие 18.12.2016 г.

На первом этапе работы производился выбор станций и интервалов сейсмограмм для построения амплитудного спектра. Отрезок брался в интервале времени от ~ 1 с до начала Sg -волны и до момента спада её амплитуды до $1/3$ от максимального значения (участок выделения 80% сейсмической энергии), далее производился расчёт спектров сейсмограмм по месту регистрации (рис. 8).

При расчётах динамических очаговых параметров землетрясений по данным Санкт-Петербургской сети учитывалось, что сейсмиче-

ские ряды со станций представляют собой записи скорости. Для использования стандартной методики расчёта сейсмического момента спектры скоростей пересчитывались в спектры смещения.

Типичные амплитудные спектры смещений и скоростей роёв Коуволла и Эркиля выглядят следующим образом (рис. 9, 10).

Из представленных рисунков можно сделать вывод, что, несмотря на узкополосный тип приборов регистрации, угловая частота, определяемая по излому спектра смещения или максимума

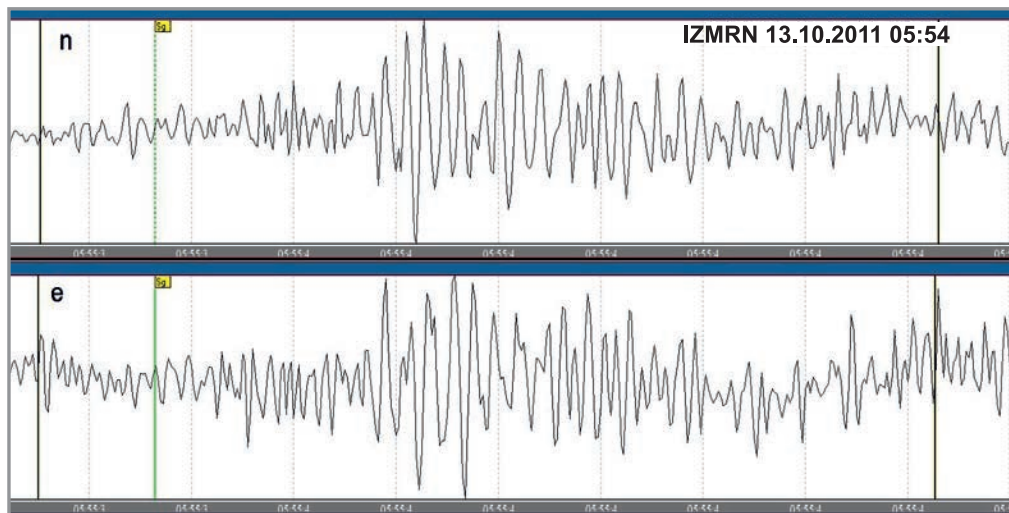


Рис. 8. Сейсмограмма горизонтальных составляющих станции «Красное озеро», событие 13.10.2011 г. в 05^h54^m.

Зелёными линиями обозначены вступления волны Sg , чёрными – границы отрезка для обработки, n – составляющая «север–юг», e – составляющая «восток–запад»

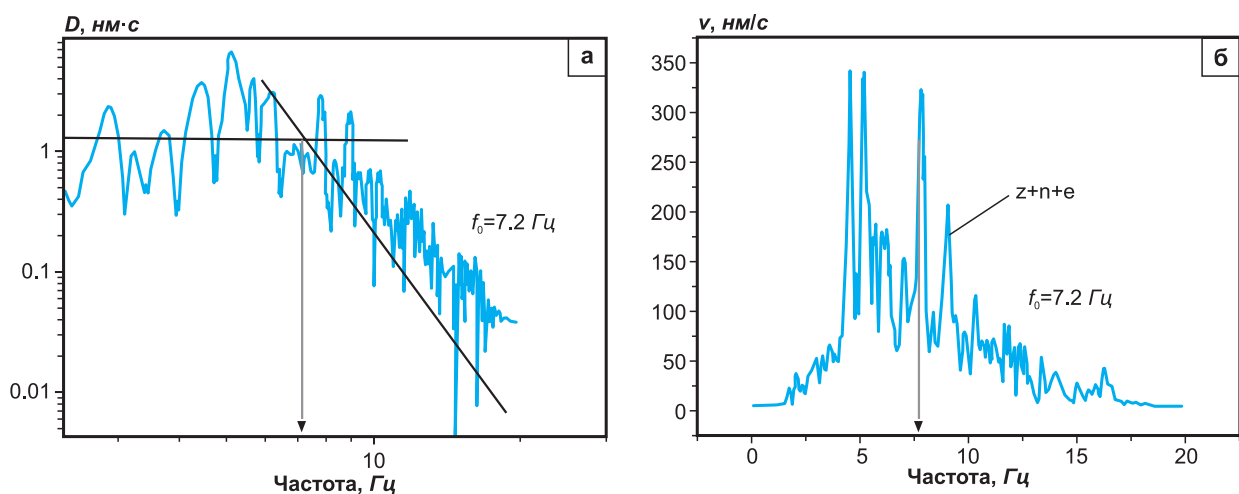


Рис. 9. Определение угловой частоты (f_0): по спектру очага (рассматривается смещение, D) в логарифмическом масштабе (а) и по станционному спектру (рассматривается скорость смещения, V) в линейном масштабе (б) землетрясения 13.10.2011 г. в 05^h54^m в Коуволла, Финляндия, станция «Красное озеро»

спектра скорости, фиксируется достаточно чётко. На низких частотах спектра отмечается плато, уровень которого пропорционален M_0 , в то время как на высоких частотах спектр линейно убывает с наклоном -2 [Havskov, Ottemoller, 2010]. Построение графиков как смещений, так и скоростей обусловлено параметрами аппаратуры и отсутствием широкополосных записей. При этом благодаря использованию двух методов с помощью сравнения имеется возможность

более точно оценить угловую частоту. Результаты расчётов очаговых параметров землетрясений с $ML=0.8-2.2$ роёв Коуволы и Эркиля отдельно представлены в табл. 3, 4. Скалярный сейсмический момент составил $10^{17}-10^{18}$ дин·см. Значения радиусов очагов находятся в интервале 0.120–0.269 км. Падение напряжения в очагах меняется от 0.01 до 1.9 бар. Ошибки определений сейсмического момента $Err f_0$ и угловой частоты $Err M_0$ посчитаны согласно работе [Arhuleta et al., 1982].

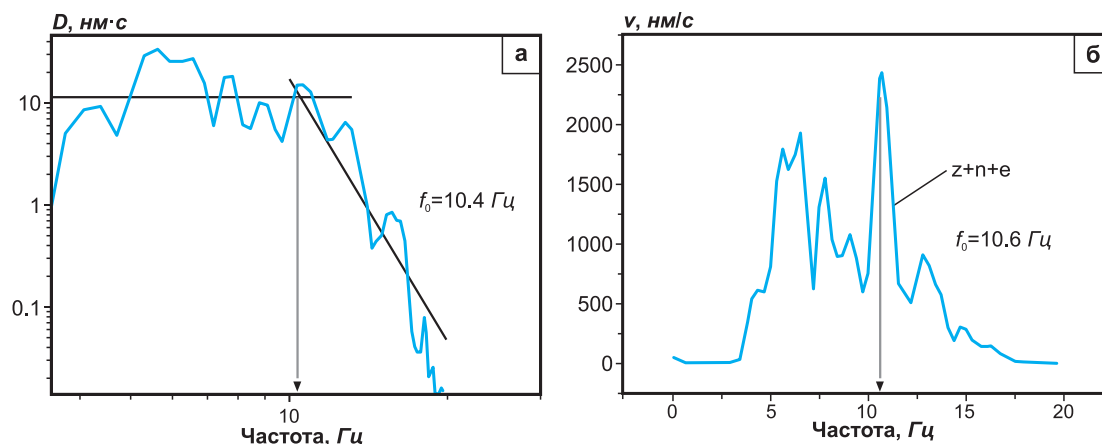


Рис. 10. Определение угловой частоты (f_0): по спектру очага (рассматривается смещение, D) в логарифмическом масштабе (а) и по станционному спектру (рассматривается скорость смещения, V) в линейном масштабе (б) землетрясения 18.12.2016 г. в 00^h20^m в Эркиля, Россия, станция «Красное озеро»

Таблица 3. Очаговые характеристики роёв Коуволы

Дата, дд.мм.гггг	ML	R , км	f_0 , Гц	$Err f_0$, Гц*	Ω_0 , нм·с станций	$Err \Omega_0$, нм·с*	Ω_0 , нм·с очага	M_0 , дин·см	$Err M_0$, дин·см*	r , км	$\Delta\sigma$, бар	$Err \Delta\sigma$, бар*
13.10.2011	1.8	157	6.4	1.29	0.55	3.28	0.94	$3.69 \cdot 10^{18}$	3.16	0.220	0.24	0.02
16.12.2014	1.9	140	7.5	1.09	0.82	2.16	1.34	$4.74 \cdot 10^{18}$	2.31	0.183	0.33	0.19
16.02.2015	1.0	152	9.0	1.21	0.11	1.74	0.20	$8.32 \cdot 10^{17}$	2.48	0.155	0.10	0.03
17.06.2015	1.9	151	9.2	1.21	0.81	3.07	1.42	$5.63 \cdot 10^{18}$	3.05	0.151	0.57	0.23
01.09.2015	1.0	137	8.7	1.00	0.11	0.06	0.19	$7.04 \cdot 10^{17}$	2.45	0.159	0.08	0.02
04.09.2015	0.9	139	8.9	1.05	0.07	0.05	0.12	$4.48 \cdot 10^{17}$	2.50	0.153	0.05	0.03
28.04.2019	2.0	151	8.6	1.18	0.47	0.22	0.82	$3.26 \cdot 10^{18}$	3.33	0.160	0.26	0.12
01.06.2019	1.3	158	10.1	1.18	0.21	0.08	0.40	$1.74 \cdot 10^{18}$	2.98	0.138	0.25	0.11

Примечание: * – Err – ошибки вычисления угловой частоты, спектральной плотности, сейсмического момента, падения напряжения в роёв Коуволы.

Таблица 4. Очаговые характеристики роёв Эркиля

Дата, время дд.мм.гггг чч:мм	ML	R , км	f_0 , Гц	$Err f_0$, Гц*	Ω_0 , нм·с станций	$Err \Omega_0$, нм·с*	Ω_0 , нм·с очага	M_0 , дин·см	$Err M_0$, дин·см*	r , км	$\Delta\sigma$, бар	$Err \Delta\sigma$, бар*
06.03.2014	1.1	64	11.3	1.22	1.52	0.03	1.60	$5.27 \cdot 10^{17}$	2.68	0.123	0.17	13.23
07.10.2015	2.1	89	5.2	1.25	3.25	0.04	4.10	$8.25 \cdot 10^{18}$	3.77	0.269	0.14	4.56
18.12.2016 00:20	2.2	101	11.0	1.05	4.52	0.17	5.77	$9.14 \cdot 10^{18}$	6.00	0.124	1.90	10.68
18.12.2016 00:30	1.5	77	9.1	1.14	4.59	0.03	4.77	$1.35 \cdot 10^{18}$	2.70	0.151	0.16	11.89
18.12.2016 00:54	0.8	99	8.7	2.28	0.04	0.00	0.05	$1.14 \cdot 10^{17}$	1.77	0.239	0.01	2.72
18.12.2016 02:35	1.2	100	7.5	1.81	0.04	0.00	0.05	$1.14 \cdot 10^{17}$	1.31	0.228	0.02	2.09
06.05.2018	1.4	96	8.5	1.61	0.18	0.01	0.22	$3.50 \cdot 10^{17}$	2.13	0.186	0.04	4.26

Примечание: * – Err – ошибки вычисления угловой частоты, спектральной плотности, сейсмического момента, падения напряжения в роёв Эркиля.

Анализ результатов

Анализ заключался в поиске взаимосвязей между показанными в таблице очаговыми параметрами и локальной магнитудой. Следует заметить, что в данной работе анализировались очень слабые тектонические землетрясения из роя Коуволла и техногенные из Эркиля.

На рис. 11 представлена зависимость логарифма сейсмических моментов землетрясений обоих исследуемых роёв от локальной магнитуды. Параметры связаны линейным уравнением $\lg M_0 = (16.40 \pm 0.27) + (1.15 \pm 0.27) \cdot ML$. Разброс достаточно велик в данном случае, поэтому применён также и отдельный анализ (рис. 12а, б).

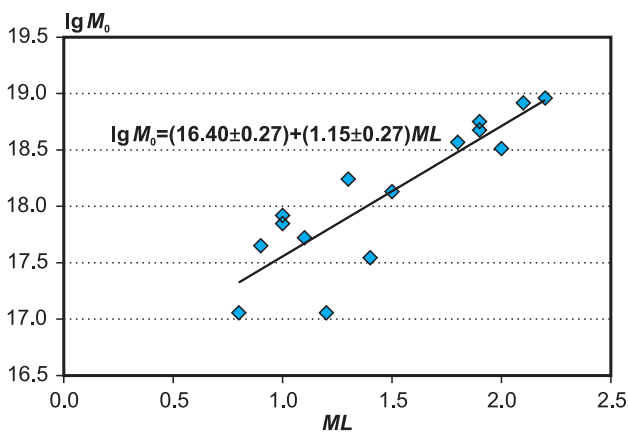


Рис. 11. Зависимость логарифма сейсмического момента от локальной магнитуды совместно роёв Эркиля и Коуволла

Несмотря на малое число исходных данных, графики делятся на две части с разным уровнем момента, сейсмические моменты событий роя Эркиля при тех же магнитудах располагаются ниже (рис. 12а, б). Интересно, что при ML больше 2 значения момента сближаются. Противоположный характер показывают уравнения связи падения напряжения $\Delta\sigma$ с локальной магнитудой (рис. 12б). Графики расходятся при увеличении магнитуды, правда разброс данных достаточно велик. Возможное объяснение расхождения графиков – особенность роя Эркиля и техногенный раскол участка коры, потребовавшего меньших тектонических усилий. Рой Эркиля возник на месте бывшего карьера – места добычи строительного камня.

Линейные зависимости остальных параметров – угловой частоты и радиуса очага – от локальной магнитуды также различны для разных роёв, при этом параметры событий Коуволла располагаются на более низком уровне, как и на рис. 12а, б. Однако вследствие больших ошибок аппроксимации эти связи мало достоверны и поэтому не приводятся.

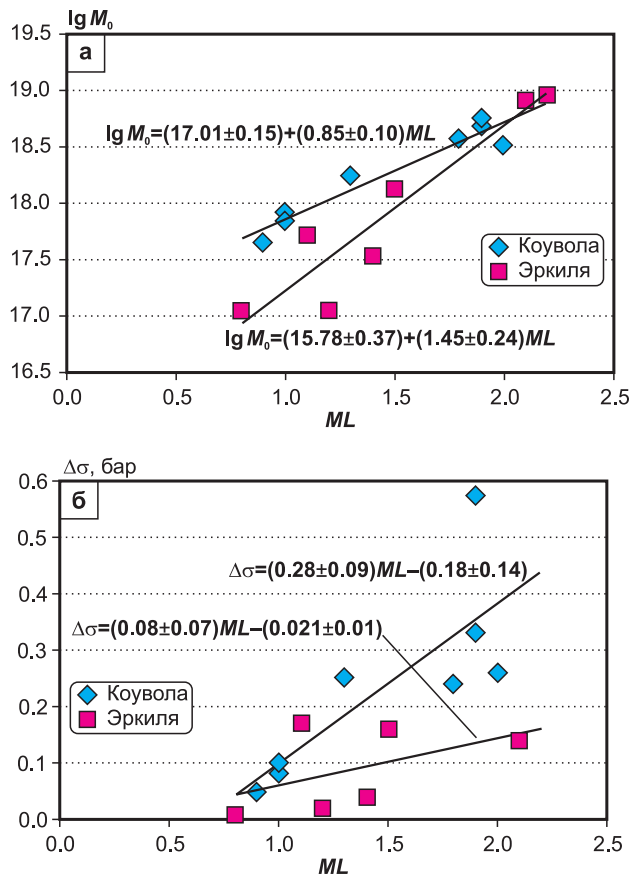


Рис. 12. Связь логарифма сейсмического момента (а) и падения напряжения (б) с локальной магнитудой для сейсмических роёв Эркиля и Коуволла раздельно

Поиску корреляций между значениями сейсмического момента M_0 и магнитуды M посвящено большое число работ (например, [Ризниченко, 1976], обзор в [Sycheva, Bogomolov, 2016], региональные [Kim et al., 1989; Saari, 1991] и др.). Там установлены соответствующие соотношения, которые в логарифмическом масштабе представляют собой линейные зависимости.

Наиболее известным среди таких соотношений можно считать среднюю корреляционную зависимость между M и M_0 : $\lg(M_0) = 15.4 + 1.6 \cdot M$ [Ризниченко, 1976]. В [Sycheva, Bogomolov, 2016] показано, что связи выполняются с доверительной погрешностью менее 10–15%. Для малых магнитуд исследуемых роёв это соотношение также грубо соблюдается (рис. 11, 12а). Основной вклад в ошибку при расчёте момента вносит погрешность оценки Ω_0 , $nm\cdot s$ – амплитуды спектра смещения в области низких частот (табл. 3, 4).

Точность расчёта величины радиуса очага и, как следствие, падения напряжений зависит, главным образом, от погрешности при определении угловой частоты. Определение f_0 ,

как известно, проводится на основе станционного или очагового спектров. По [Sycheva, Bogomolov, 2016] изменение угловой частоты на 10% изменяет значение радиуса очага на 11% и уровень сброшенных напряжений – на 30%. По данным работ, посвящённых расчётам очаговых параметров [Parolai et al., 2007; Oth et al., 2011], получается, что погрешность оценки сейсмического момента M_0 , пропорционального амплитуде спектра смещения в области низких частот Ω_0 , меньше погрешности определения угловой частоты и радиуса очага. Если наибольшая погрешность имеет место при оценке угловой частоты, а частота, радиус очага и падение напряжения взаимозависимы, соответственно погрешности также связаны между собой. Сделанные в нашей работе оценки среднего значения угловой частоты с погрешностью по скорости составили $8.1 \pm 1.86 \text{ Гц}$ (22%), по смещению – $9.8 \pm 1.35 \text{ Гц}$ (14%). Эта величина, а также уровень горизонтальной части спектра сейсмических сигналов, главным образом определяют величину погрешности определения очаговых параметров. Источником данных являются сейсмограммы. В литературе [Сейсмоприёмники ..., 2022] для магнитоэлектрических сейсмоприёмников СМ-3КВ предел допускаемой основной погрешности записей составляет 8–35%.

На Фенноскандинавском щите в 1989 г. выполнены определения аналогичных данных, таких как сейсмический момент, радиус очага и падение напряжения землетрясений всего региона [Kim et al., 1989]. Данные состояли из большого числа фаз Lg тектонических землетрясений с магнитудой ML от 2 до 5.2, записанных на вертикальных компонентах короткопериодных аналоговых сейсмограмм. Сейсмический момент менялся в диапазоне от $3 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{20} \text{ дин}\cdot\text{см}$, угловая частота – $2.5\text{--}5.8 \text{ Гц}$, радиусы источников, оценённые по угловой частоте, составили $0.2\text{--}1.0 \text{ км}$, падения напряжения – в диапазоне примерно от 0.1 до 10 бар. Выбранные события здесь в основном сильнее, чем в нашем случае, поэтому полученные очаговые параметры (за исключением угловой частоты) тоже больше.

В районе города Ловийса, расположенного на берегу Финского залива, зарегистрированы и исследованы 29 тектонических событий в интервале $ML=0.1\text{--}1.2$ [Saari, 1991]. В среднем эти землетрясения слабее, чем выбранные в нашей работе. Получены значения сейсмического момента $1 \cdot 10^{14}\text{--}2.1 \cdot 10^{15} \text{ дин}\cdot\text{см}$, радиуса очага – $0.023\text{--}0.072 \text{ км}$, падения напряжения – $0.62\text{--}1.6 \text{ бар}$, что существенно меньше значений, вычисленных в данном исследовании. Так как

события очень слабые, угловая частота f_0 больше $18\text{--}58 \text{ Гц}$, что закономерно.

Интересно сравнить полученные результаты с мировыми данными. Повсеместно получен вывод, что значения падения напряжения наведённых землетрясений сопоставимы с таковыми для тектонических событий при равных магнитудах. В случае данной работы это верно при $ML \geq 2$.

Так, в [Tomic et al., 2009] изучена большая выборка техногенных землетрясений, возникших при заполнении водохранилища в Бразилии в интервале $ML=1.9\text{--}2.1$, детально исследовано только падение напряжения, оно составило $2.6\text{--}17.9 \text{ бар}$, что существенно больше, чем в данной работе.

В работе [Takuji et al., 2007] исследовались динамические параметры 20 техногенных микроземлетрясений ($0.0 < Mw < 1.3$) в золотодобывающей шахте Южной Африки на глубине 2650 м для сравнения их с характеристиками сильных землетрясений. Регистрация происходила скважинными сейсмографами с частотой 15 кГц . Были определены близкие угловые частоты, затухание и падение напряжения. Последний параметр составил $0.32\text{--}8.8 \text{ бар}$, что также превышает значения в табл. 3 и 4.

В некоторых работах обращено внимание на то, что величина $\Delta\sigma$ может зависеть не только от магнитуды M , но и от типа фокального механизма. Во многих случаях [Sycheva, Bogomolov, 2016] при землетрясениях взбросового типа падение напряжений больше, чем при сдвиговых событиях примерно такой же энергии.

Выводы

Целью данной работы была оценка очаговых (динамических) параметров для тектонического роя землетрясений Коуволы и техногенного Эркия, имевших место на юго-востоке Фенноскандинавского щита, и их сравнительный анализ. Оказалось, что для очень малых магнитуд численные значения сейсмического момента зависят от природы возникновения событий, тектонической (они больше) или индуцированной, но связь с генезисом исчезает при $ML \geq 2$.

В данной работе для слабых тектонических землетрясений роя Коуволы выполняется соотношение между сейсмическим моментом M_0 и локальной магнитудой ML $\lg M_0 = (17.01 \pm 0.15) + (0.85 \pm 0.10) \cdot ML$ для событий техногенной природы роя Эркия оно другое – $\lg M_0 = (15.78 \pm 0.37) + (1.45 \pm 0.24) \cdot ML$. Некоторая корреляция имеется также между значениями падения напряжений

в очаге и локальной магнитудой событий (рис. 12б), но они также различны при увеличении магнитуды в случае изменения генезиса сейсмических событий.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Авторы выражают благодарность редакторам и рецензентам статьи за сделанные замечания и исправления.

Литература

- Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г. – EDN: IJOVUE
- Баранов С.В., Асминг С.В., Асминг В.Э., Карпинский В.В., Лебедев А.А., Мунирова Л.М., Пойгина С.Г. III. Результаты детального сейсмического мониторинга. Восточная часть Балтийского щита // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 113–116. – URL: http://www.ceme.gsras.ru/zr/uploads/files/2020/2020-ER_p113-116.pdf. – EDN: RPRCHL
- Габсатарова И.П., Асминг С.В., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Карпинский В.В., Конечная Я.В., Мехрюшев Д.Ю., Надёжка Л.И., Нестеренко М.Ю., Носкова Н.Н., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А. I. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 25–33. – URL: http://www.ceme.gsras.ru/zr/uploads/files/2020/2020-ER_p025-033.pdf. – EDN: LUBXOS
- Государственная геологическая карта России (ГГК-1000, ГГК-200). Масштаб 1:1000000 (новая серия), 1:200000 (первое, второе издание). Справочно-поисковая система // Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского [сайт]. – [Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2022]. – URL: <http://www.geolkart.ru>
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 9–26.
- Сейсмоприёмники магнитоэлектрические СМ-ЗКВ // ALL-Pribors.ru [сайт]. – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/21601-01-sm-3kv-17863>
- Сеть сейсмических станций // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022]. – URL: <http://www.gsras.ru/new/struct/>
- Ahjos T., Uski M. Earthquakes in Northern Europe in 1375–1989 // Tectonophysics. – 1992. – V. 207. – P. 1–23.
- Archuleta R.J., Cranswinck E., Mueller C., Spudich P. Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California earthquake sequence // Journal Geophysical Research. – 1982. – V. 87. – P. 4995–1607.
- Assinovskaya B.A., Gabsatarova I.P., Panas N.M., Uski M. Seismic events in 2014–2016 around the Karelian Isthmus and their nature // Seismic Instruments. – 2019. – V. 55, N 1. – P. 24–40. DOI: 10.3103/S074792391901002X
- Brune J. Correction to “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes” // Journal of Geophysical Research. – 1971. – V. 76, N 20. – P. 5002. DOI: 10.1029/JB076i020p05002
- Brune J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. – 1970. – V. 75. – P. 4997–5009.
- Bungum H., Vaage S., Husebye E.S. The Meloy earthquake sequence, Northern Norway: Source parameters and their scaling relations // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1982. – V. 72, N 1. – P. 197–206. DOI: 10.1785/BSSA0720010197
- Härme M. General geologic map of Finland 1:400000. Map of Pre-Quaternary rocks, sheet C1-D1. – Helsinki, Finland: Geol. Surv., 1980. – 95 p.
- Havskov J., Ottemoller L. Routine data processing in earthquake seismology. – Springer Dordrecht, 2010. – 347 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8697-6
- New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2) // IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam / Ed. P. Bormann. – 2012 [Электронный ресурс]. – URL: <http://nmsop.gfz-potsdam.de>
- Kim W.Y., Wahlstrom R., Uski M. Regional spectral scaling relations of source parameters for earthquakes in the Baltic shield // Tectonophysics. – 1989. – V. 166, N 1–3. – P. 151–161.
- Kwamme L.B., Hansen R.A., Bungum H. Seismic-source and wave-propagation effect of Lg waves in Scandinavia // Geophysical Journal International. – 1995. – V. 120. – P. 525–536.
- Oth A., Bindi D., Parolai S., Giacomo D. Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part II: On Attenuation characteristics, source spectra, and site response of borehole and surface stations // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2011. – V. 101, N 2. – P. 667–687. DOI: 10.1785/0120100135
- Parolai S., Richwalski S.M., Milkereit C., Bormann P. Assessment of the stability of H/V spectral ratios from ambient noise and comparison with earthquake data

- in the Cologene area (Germany) // *Tectonophysics*. – 2004. – V. 390, Is. 1–4. – P. 57–73. DOI: 10.1016/j.tecto.2004.03.024
- Renquist H.* Finlands jordskalv // *Fennia*. – 1930. – V. 54, N 1. – 113 p.
- Saari J.* Microearthquakes and seismotectonic analysis for a nuclear plant area in southeastern Finland // *Engineering Geology*. – 1991. – V. 31. – P. 231–247.
- Smedberg I., Uski M., Tiira T., Korja A., Komminaho K.* Intraplate earthquake swarm in Kouvola, South-Eastern Finland // *General Assembly European Geosciences Union*. – Vienna, Austria, 2012. – EGU2012–8446.
- Sycheva N.A., Bogomolov L.M.* Patterns of stress drop in earthquakes of the Northern Tien Shan // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – V. 57, N 11. – P. 1635–1645. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.10.009. – EDN: XFONQN
- Sycheva N.A., Bogomolov L.M.* Stress drop in the sources of intermediate-magnitude earthquakes in Northern Tien Shan // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – V. 50, N 3. – P. 415–426. DOI: 10.1134/S1069351314030112. – EDN: SKTGID
- Takuji Y., James J., Ide S., Abercrombie R.E., Kawakata H., Nakatani M., Iio Y., Ogasawara H.* Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – V. 112. – B03305. DOI: 10.1029/2006JB004553
- Tomic J., Abercrombie R.E., Nascimento A.F.* Source parameters and rupture velocity of small $M \leq 2.1$ reservoir induced earthquakes // *Geophysical Journal International*. – 2009. – V. 179, N 2. – P. 1013–1023. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04233.x
- Uski M., Tiira T., Korja A., Elo S.* The 2003 earthquake swarm in Anjalankoski, south-eastern Finland // *Tectonophysics*. – 2006. – V. 422. – P. 55–69. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.05.014

Сведения об авторах

Ассиновская Бэла Александровна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Санкт-Петербург. E-mail: assin.bela@gmail.com

Панас Наталья Михайловна, инж. 1 кат. ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург. E-mail: natagold-86@inbox.ru

Dynamic parameters of weak earthquakes on the southeastern slope of the Baltic Shield

© 2022 N.M. Panas, B.A. Assinovskaya

GS RAS, St. Petersburg, Russia

Received February 22, 2022

Abstract The dynamic parameters of earthquake sources characterize the features of the process of destruction of the seismogenic medium. These parameters are defined in the world for earthquakes of different magnitudes and different genesis. For the seismically weakly active region of Fennoscandia, the source characteristics of earthquakes were characterized in the 1990s from analog records. In this paper, we obtained a summary of the indicated values for weak earthquakes with $ML=1-2$ that took place on the southeastern slope of the Fennoscandian shield in 2009–2019 for two earthquake swarms of different origins - tectonic Kouvola and technogenic Erkilia. The work was carried out according to the data of the St. Petersburg digital seismic network. In the process of research, using seismograms of the network, the spectra of direct waves S_g were constructed, the values of the seismic moment, corner frequency, source radius and stress drop for 15 earthquakes of a tectonic and technogenic nature were calculated. The results obtained, although they have a spread in values, do not differ much from the world averages. However, it turned out that the seismic moment and stress drop significantly depend on the genesis of events.

Keywords Weak earthquake, magnitude, seismic moment, stress drop, source radius, Fennoscandia, Vyborg rapakivi granite intrusion, seismic swarm.

For citation Panas, N.M., & Assinovskaya, B.A. (2022). [Dynamic parameters of weak earthquakes on the southeastern slope of the Baltic Shield]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(4), 65–78. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.05. EDN: AFPGFJ

References

- Ahjos, T., & Uski, M. (1992). Earthquakes in Northern Europe in 1375–1989. *Tectonophysics*, 207, 1–23.
- Akimov, A.P., & Krasilov, S.A. (2020). [WSG software package “Seismic data processing system”]. Certificate of state registration of a computer program No. 2020664678. (In Russ.). EDN: IJOVUE
- ALL-Pribors.ru. (2022). [Magnetoelectric seismometer SM-3KV]. Retrieved from <https://all-pribors.ru/opisanie/21601-01-sm-3kv-17863> (In Russ.).
- Archuleta, R.J., Cranswinck, E., Mueller, C., & Spudich, P. (1982). Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research*, 87, 4995–1607.
- Assinovskaya, B.A., Gabsatarova, I.P., Panas, N.M., & Uski, M. (2019). Seismic events in 2014–2016 around the Karelian Isthmus and their nature. *Seismic Instruments*, 55(1), 24–40. DOI: 10.3103/S074792391901002X
- Baranov, S.V., Asming, S.V., Asming, V.E., Karpinsky, V.V., Lebedev, A.A., Munirova, L.M., & Poygina, S.G. (2022). [III. Results of detailed seismic monitoring. Eastern part of the Baltic Shield]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020] (pp. 25–33). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: RPRCHL
- Brune, J. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75, 4997–5009.
- Brune, J. (1971). Correction to “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes”. *Journal of Geophysical Research*, 76, 5002. DOI: 10.1029/JB076i020p05002
- Bungum, H., Vaage, S., & Husebye, E.S. (1982). The Meloy earthquake sequence, Northern Norway: Source parameters and their scaling relations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(1), 197–206. DOI: 10.1785/BSSA0720010197
- Gabsatarova, I.P., Asming, S.V., Verkholtantsev, F.G., Golubeva, I.V., Dyagilev, R.A., Karpinsky, V.V., Konechnaya, Ya.V., Mekhryushev, D.Yu., Nadezhka, L.I., Nesterenko, M.Yu., Noskova, N.N., Pivovarov, S.P., Poygina, S.G., & Sanina, I.A. (2022). [I. Results of regional seismic monitoring within Russia. East-European platform, Ural Mountains and Western Siberia]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020] (pp. 25–33). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: LUBXOS

- Gosudarstvennaia geologicheskaiia karta Rossii (GGK-1000, GGK-200). Masshtab 1:1 000 000 (novaia seriia), 1:200 000 (pervoe, vtoroe izdanie). Spravochno-poiskovaiia sistema [State Geological Map of Russia (GGK-1000, GGK-200). Scale 1:1,000,000 (new series), 1:200,000 (first, second edition). Reference and search system]. St. Petersburg, Russia: FGBU "VSEGEI" Publ. Retrieved from <http://www.geolkarta.ru> (In Russ.).*
- GS RAS. (2022). Network of seismic stations. Retrieved from <http://www.gsras.ru/new/eng/struct/>
- Härme, M. (1980). *General geologic map of Finland 1:400,000. Map of Pre-Quaternary rocks, sheet C1-D1*. Helsinki, Finland: Geol. Surv. Publ., 95 p.
- Havskov, J., & Ottemoller, L. (2010). Routine data processing in earthquake seismology. Springer Dordrecht Publ., 347 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8697-6
- Bormann, P. (Ed.) (2012). *New manual of seismological observatory practice (NMSOP). IASPEI* (pp. 3-16-3-49). Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum. Retrieved from <http://nmsop.gfz-potsdam.de>
- Kim, W.Y., Wahlstrom, R., & Uski, M. (1989). Regional spectral scaling relations of source parameters for earthquakes in the Baltic Shield. *Tectonophysics*, 166(1-3), 151-161.
- Kwamme, L.B, Hansen, R.A., & Bungum, H. (1995). Seismic-source and wave-propagation effect of Lg waves in Scandinavia. *Geophysical Journal International*, 120, 525-536.
- Oth, A., Bindi, D., Parolai, S., & Giacomo, D. (2011). Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part II: On attenuation characteristics, source spectra, and site response of borehole and surface stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(2), 667-687. DOI: 10.1785/0120100135
- Parolai, S., Richwalski, S.M., Milkereit, C., & Bormann, P. (2004). Assessment of the stability of H/V spectral ratio from ambient noise and comparison with earthquake data in the Cologene area (Germany). *Tectonophysics*, 390(1-4), 57-73. DOI: 10.1016/j.tecto.2004.03.024
- Renquist, H. (1930). Finlands jordskalv. *Fennia*, 54(1), 113 p.
- Riznichenko, Yu.V. (1976). [The size of the crustal earthquake and the seismic moment]. In *Issledovaniia po fizike zemletriasenii [Research on the physics of earthquakes]* (pp. 9-26). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Saari, J. (1991). Microearthquakes and seismotectonic analysis for a nuclear plant area in southeastern Finland. *Engineering Geology*, 31, 231-247.
- Smedberg, I., Uski, M., Tiira, T., Korja, A., & Komminaho, K. (2012). Intraplate earthquake swarm in Kouvola, South-Eastern Finland. In *General Assembly European Geosciences Union*. Vienna, Austria, EGU2012-8446.
- Sycheva, N.A., & Bogomolov, L.M. (2014). Stress drop in the sources of intermediate-magnitude earthquakes in Northern Tien Shan. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(3), 415-426. DOI: 10.1134/S1069351314030112. EDN: SKTGID
- Sycheva, N.A., & Bogomolov, L.M. (2016). Patterns of stress drop in earthquakes of the Northern Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*, 57(11), 1635-1645. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.10.009. EDN: XFONQN
- Takuji, Y., James, J., Ide, S., Abercrombic, R.E., Kawakata, H., Nakatani, M., Iio, Y., & Ogasawara, H. (2007). Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine. *Journal of Geophysical Research*, 112, B03305. DOI: 10.1029/2006JB004553
- Tomic, J., Abercrombic, R.E., & Nascimento, A.F. (2009). Source parameters and rupture velocity of small $M \leq 2.1$ reservoir induced earthquakes. *Geophysical Journal International*, 179(2), 1013-1023. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04233.x
- Uski, M., Tiira, T., Korja, A., & Elo, S. (2006). The 2003 earthquake swarm in Anjalankoski, south-eastern Finland. *Tectonophysics*, 422, 55-69. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.05.014

Information about authors

Assinovskaya Bela Aleksandrovna, PhD, Senior Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), St. Petersburg, Russia. E-mail: assin.bela@gmail.com

Panas Natalya Mikhailovna, Category 1 engineer of the GS RAS, St. Petersburg, Russia. E-mail: natagold-86@inbox.ru