

УДК 550.343.6

О пространственном распределении постсейсмической активности в Хибинском массиве

© 2020 г. С.В. Баранов¹, А.Ю. Моторин², П.Н. Шебалин³

¹КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия; ²КФ АО «Апатит», г. Кировск, Россия;

³ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Используя данные о сейсмичности Хибинского массива, показано, что расстояния от сейсмических событий, инициированных более ранним сейсмическим событием (триггером), до их триггеров подчиняются степенному распределению с параметром, не зависящим от магнитуды события-триггера. Ранее было показано, что такое же распределение справедливо и для тектонической сейсмичности [Felzer, Brodsky, 2006; Richards-Dinger et al., 2010]. Дополнительно в настоящей работе показано, что в Хибинском массиве распределение расстояний от сейсмических событий до инициирующих их взрывов-триггеров также является степенным. Таким образом, степенной характер пространственного распределения постсейсмической активности имеет место и в условиях техногенной сейсмичности. Один и тот же вид распределения для постсейсмической и поствзрывной активности в Хибинах даёт основание полагать, что пространственное распределение определяется свойствами среды и не зависит от механизма её возмущения (сейсмическое событие или взрыв). Использование этих закономерностей и установленного нами ранее закона продуктивности землетрясений, подтверждённого для техногенной сейсмичности и сейсмической продуктивности взрывов, позволяет с заданной вероятностью оценить зону, где ожидаются повторные толчки.

Ключевые слова: Хибинский массив, сейсмические события, взрывы, повторные толчки, пространственное распределение.

Для цитирования: Баранов С.В., Моторин А.Ю., Шебалин П.Н. О пространственном распределении постсейсмической активности в Хибинском массиве // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.03>

Введение

Рассматривается вопрос о пространственном распределении сейсмических событий, инициированных другим, более ранним, сейсмическим событием или взрывом. Район исследований – Хибинский массив, который представляет собой высоконапряжённую крупную щелочную интрузию палеозойского возраста и характеризуется разнообразием форм тектонических структур [Онохин, 1975; Арзамасцев и др., 2013]. На территории массива Кировский филиал (КФ) АО «Апатит» и Северо-Западная фосфорная компания ведут добычу апатит-нефелиновых руд подземным и открытым способами.

Добыча полезных ископаемых в тектонически нагруженных массивах горных пород приводит к возникновению техногенной сейсмичности [Адушкин, 2016]. В подземных выработках действующих рудников под воздействием повышенного горного давления происходит нару-

шение сплошности массива в их приконтурной части, что проявляется в динамических формах в виде шелушения и стреляния пород, динамического заколообразования, толчков, микроударов и горных ударов и техногенных землетрясений [Козырев и др., 2016]. Как и в случае тектонической сейсмичности, техногенные землетрясения могут инициировать повторные толчки (афтершоки) [Plenkens et al., 2010; Woodward, Wesseloo, 2015; Козырев и др., 2018; Баранов и др., 2019].

Помимо землетрясений, повторные толчки могут быть инициированы взрывами, производимыми при добыче полезных ископаемых. В этом случае поствзрывная сейсмичность аналогична афтершоковому процессу, где роль основного толчка играет взрыв, а затухание описывается законом Омори-Утсу [Plenkens et al., 2010; Woodward, Wesseloo, 2015; Vallejos, McKinnon, 2010; Vallejos, Estay, 2018]. Сейсмические события, инициированные взрывами, могут представлять самостоятельную опасность [Козырев и др., 2018].

Ранее нами было показано, что в Хибинском массиве число толчков, инициированных более ранним сейсмическим событием или взрывом, подчиняется экспоненциальному распределению [Баранов и др., 2019; 2020], аналогичному распределению магнитуд Гутенберга-Рихтера. Это, во-первых, показывает, что распределение числа инициированных событий определяется свойствами среды и не зависит от механизма возмущения (взрыв или сейсмическое событие). Во-вторых, дополнительно свидетельствует в пользу того, что поствзрывная и постсейсмическая активности имеют близкие механизмы возникновения, обусловленные скачком напряжений в результате основного толчка или взрыва. Другим свидетельством близости механизмов является то, что затухание толчков, инициированных более ранним сейсмическим событием или взрывом, подчиняется закону Омори-Утсу.

В настоящем исследовании мы покажем, что в Хибинском массиве пространственное распределение толчков, инициированных сейсмическими событиями или взрывами, начиная с некоторого момента времени, подчиняется степенному распределению. Этот результат согласуется с результатами, полученными для тектониче-

ской сейсмичности Южной Калифорнии [Felzer, Brodsky, 2006] и района Японии [Richards-Dinger et al., 2010]. Эти же работы являются отражением известной дискуссии о том, может ли динамический перенос напряжений являться триггером повторных толчков. Отметим, что, как и в случае продуктивности, один и тот же вид распределения для толчков, инициированных сейсмическими событиями или взрывами, указывает на то, что соответствующие пространственные особенности определяются свойствами среды, а не механизмом её возмущения (сейсмическое событие или взрыв).

Исходные данные и выделение инициированных событий

В исследовании использован каталог сейсмических событий, зарегистрированных сетью сейсмического мониторинга КФ АО «Апатит» [Корчак и др., 2014] за период с 1996 г. по июнь 2019 г. (рис. 1). В настоящее время сеть состоит из 50 трёхкомпонентных сейсмических датчиков с частотой дискретизации входных сигналов 1000 Гц, расположенных на Кировском и Расвумчоррском рудниках. Мониторинговая сеть

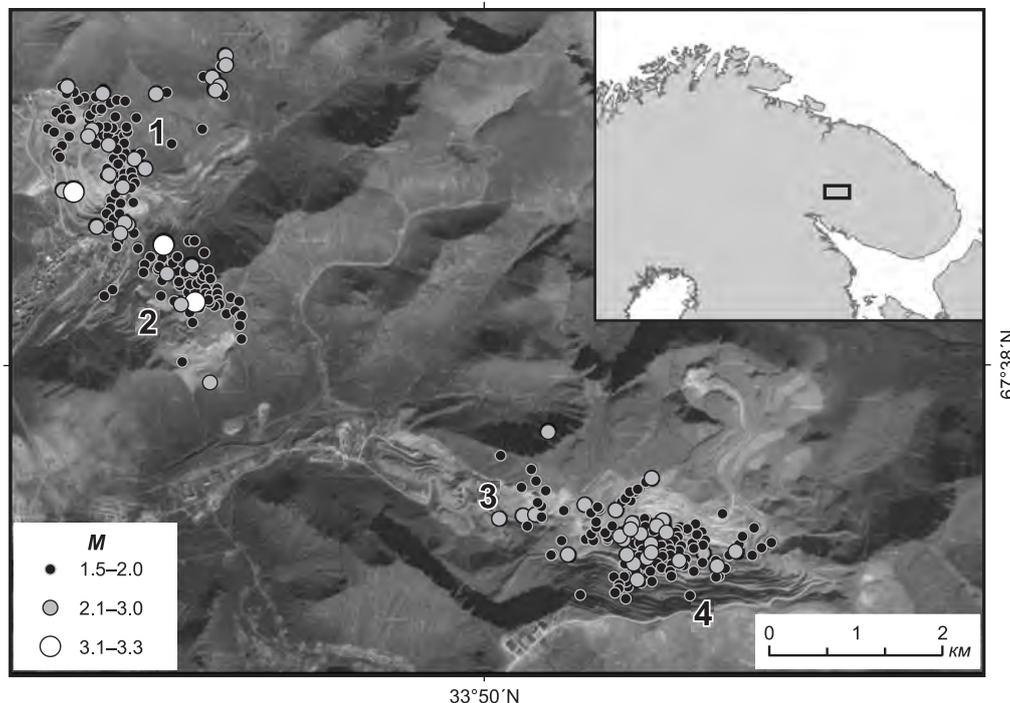


Рис. 1. Эпицентры сейсмических событий с $M \geq 1.5$ за период 1996 г. – июнь 2019 г. по данным сети сейсмического мониторинга КФ АО «Апатит».

Цифрами обозначены: 1 – Кукисвумчоррское месторождение; 2 – Юкспорское месторождение (отрабатывает Кировский рудник); 3 – месторождение «Апатитовый Цирк» (Расвумчоррский рудник); 4 – плато Расвумчорр (до 2014 г. – Центральный, в настоящее время – Восточный рудник). Вставка – прямоугольником показано местоположение района исследований

позволяет определять гипоцентры сейсмических событий с энергией $E=10^3$ Дж с точностью до 25 м в зоне повышенной точности и до 100 м – в районе уверенной регистрации. С 2010 г. мониторинг ведётся объединённой системой контроля сейсмичности Хибинского массива с привлечением данных сети сейсмических станций Кольского филиала (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН. С этой целью в КоФ ФИЦ ЕГС РАН была разработана информационная система ЛОРС (локатор региональной сейсмичности). Начиная с 1996 г., использованный каталог имеет представительную магнитуду $M_c \leq 0$, что соответствует представительной энергии $E_c \leq 10^4$ Дж.

В настоящей работе в качестве триггеров рассматривались сейсмические события с магнитудой $M_T \geq 1.5$ (энергия $E_T \geq 5 \cdot 10^6$ Дж) и взрывы с магнитудой $M_T \geq 2$ ($E_T \geq 4 \cdot 10^7$ Дж). Здесь M_T (E_T) – магнитуда (энергия) триггера.

Толчки, инициированные сейсмическими событиями, были ограничены снизу магнитудным порогом $M \geq M_T - 1.5$, а толчки, инициированные взрывами, – магнитудным порогом $M \geq M_T - 2$. Выбор таких порогов для магнитуд инициированных событий корректен, поскольку в рассматриваемом периоде представительная магнитуда каталога (M_c) не превышала 0.

Выделение триггеров (сейсмических событий или взрывов) и инициированных ими толчков осуществлялось методом ближайшего соседа [Zaliapin, Ben-Zion, 2016]. Метод основан на использовании функции близости по пространству–времени–магнитуде, зависящей от параметров сейсмического режима (наклон графика повторяемости и фрактальная размерность гипоцентров). Применение этого метода к сейсмичности Хибинской природно-технической системы подробно рассмотрено в [Баранов и др., 2019; 2020]. Здесь мы приведём лишь краткое описание.

Близость пространству–времени–магнитуде между двумя событиями задаётся функцией вида [Baiesi, Paczuski, 2004]:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij} (r_{ij})^{d_f} \cdot 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Если в качестве триггеров рассматриваются сейсмические события, то $t_{ij} = t_j - t_i$ – время между событиями, которое положительно, если событие j происходит после события i , и отрицательно в противном случае; $r_{ij} \geq 0$ – пространственное расстояние между гипоцентрами событий; m_i – магнитуда i -го события; b – параметр зако-

на Гутенберга-Рихтера; d_f – фрактальная размерность распределения гипоцентров.

Если же в качестве триггеров рассматриваются взрывы, то $t_{ij} = t_j - t_i$ – время между событием j (номер из каталога сейсмичности) и взрывом i (номер из каталога взрывов). Значение t_{ij} положительно, если событие j происходит после взрыва i , и отрицательно в противном случае. Через r_{ij} обозначим пространственное расстояние между гипоцентрами события j и взрыва i ; m_i – магнитуда i -го взрыва; b – параметр закона Гутенберга-Рихтера, оценённый по каталогу сейсмических событий; d_f – фрактальная размерность распределения гипоцентров сейсмических событий.

Для каждого сейсмического события из каталога рассчитывается значение функции близости (1) до всех предыдущих событий (или взрывов). Событие или взрыв, на котором значение близости минимально, объявляется «ближайшим соседом» (или потенциальным триггером). В результате каждому событию (кроме первого) приписывается его ближайший сосед.

Если на исследуемой территории часть сейсмических событий инициируется другими, более ранними, событиями-триггерами (или взрывами-триггерами), это приводит к росту числа событий в единицу времени в некоторой пространственно-временной окрестности триггера. Это явление называется пространственно-временной кластеризацией или группированием сейсмичности. Очевидно, чем больше событий происходит внутри некоторой области пространства–времени, тем меньше расстояния до ближайшего соседа. Можно показать ([Zaliapin, Ben-Zion, 2016] и ссылки там же), что если наряду с фоновыми землетрясениями присутствуют инициированные ими события (афтершоки), то распределение логарифма расстояний до «ближайшего соседа» является бимодальным, при этом левая часть гистограммы распределения соответствует кластеризованной сейсмичности, а правая – фоновой. Фактически задача сводится к выбору значения η_0 , которое разделяет кластеризованную и фоновую сейсмичность.

Имеются различные способы определения порога η_0 (подробнее см. [Zaliapin, Ben-Zion, 2016; Bayliss et al., 2019]), выработанные для декластеризации каталогов тектонических землетрясений. В случае техногенной сейсмичности для выбора порога η_0 лучше использовать модельно-независимый метод [Баранов и др., 2020; Shebalin et al., 2020]. Идея метода заключается в рандомизации каталога с целью декомпозиции распределения расстояний до ближайшего

соседа на две части, воспроизводящие распределение для независимых и инициированных триггерами событий.

Пусть $F_{\text{real}}(\eta)$ – распределения расстояний до ближайшего соседа (сейсмического события или взрыва) в реальном каталоге. Выполним декомпозицию:

$$F_{\text{real}}(\eta) = (1 - k)F_{\text{clustered}}(\eta) + kF_{\text{random}}(\eta), \quad (2)$$

где $F_{\text{random}}(\eta)$ воспроизводит распределение некластеризованных сейсмических событий, полученных по рандомизированному каталогу (для времени каждого события гипоцентр и магнитуда выбраны случайным образом из каталога); $F_{\text{clustered}}(\eta)$ – распределение для кластеризованных событий, инициированных более ранними землетрясениями или взрывами; вес k находится из наилучшего совпадения соответствующих плотностей $k p_{\text{random}}(\eta)$ с правой ветвью $p_{\text{real}}(\eta)$. Толстая и тонкая чёрные кривые на рис. 2 показывают кластеризованную и случайную компоненты соответственно.

Пороговое значение η_0 определяется как значение η , для которого доля кластеризованных событий с ближайшими соседями $\eta > \eta_0$ (ошибка I рода) равна доле некластеризованных событий с ближайшими соседями $\eta \leq \eta_0$ (ошибка II рода) (рис. 2б):

$$1 - F_{\text{clustered}}(\eta_0) = \frac{F_{\text{real}}(\eta_0) + kF_{\text{random}}(\eta_0)}{1 - k} = F_{\text{random}}(\eta_0). \quad (3)$$

Этот подход был впервые применён к сейсмичности Хибинского массива в работе [Баранов и др., 2020]

с целью выделения сейсмических событий, инициированных более ранними землетрясениями-триггерами. Здесь мы приведём иллюстрацию применения этого подхода на примере используемых данных, рассмотрев в качестве потенциальных триггеров промышленные взрывы (рис. 2). Эмпирическое распределение вероятностей величины $\lg(\eta)$ (серая кривая на рис. 2а) имеет два максимума, что означает хорошую разделяемость инициированных взрывами и независимых от них сейсмических событий. События с расстояниями до взрывов меньше значения η_0 считаются инициированными ими, остальные же не имеют прямой связи с потенциальными триггерами.

В результате расчётов получились следующие значения параметров функции близости (1), оценённые по каталогу сейсмических событий: наклон графика повторяемости $b=1.25$, фрактальная размерность распределения гипоцентров $d_f=1.50$.

Параметры для декластеризации по формулам (1), (2): для сейсмических событий-триггеров – вес $k=0.5$, порог $\eta_0=5.62 \cdot 10^{-7}$; для взрывов-триггеров – вес $k=0.4$, порог $\eta_0=5.62 \cdot 10^{-6}$.

Применяя полученные оценки к используемым данным, получилось, что 429 сейсмических событий с магнитудами $M_T \geq 1.5$ были идентифицированы как триггеры. Они ассоциированы с 1177 инициированными событиями с относительными магнитудами $M \geq M_T - 1.5$. 2181 взрыв с $M_T \geq 2$ ($E \geq 4 \cdot 10^7$ Дж) был идентифицирован как триггер и ассоциирован с 5793 инициированными сейсмическими событиями с относительными магнитудами $M \geq M_T - 2$.

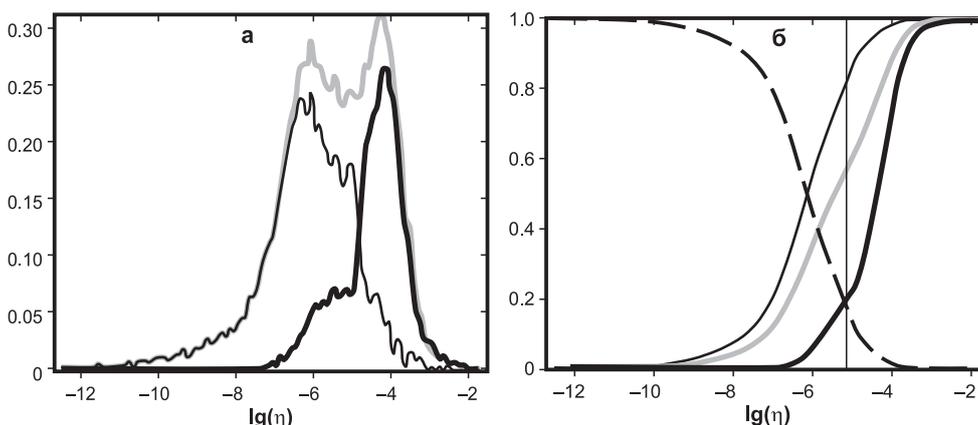


Рис. 2. Определение порога η_0 для функции близости η (1) при $M \geq 0$:

а – распределение вероятностей функции близости (1) для ближайших взрывов в реальном каталоге $p_{\text{real}}(\eta)$ (серая линия), и её декомпозиция на две компоненты (шаг 3 в тексте): $k p_{\text{random}}$ (толстая чёрная линия) и $(1 - k) \cdot p_{\text{clustered}} = p_{\text{real}} - k p_{\text{random}}$ (тонкая чёрная линия). Рандомизированный каталог получен, как описано в тексте; б – определение порога η_0 : функция распределения F_{real} (серая линия), F_{random} (толстая чёрная линия), $F_{\text{clustered}}$ (тонкая чёрная линия) и её компонента $1 - F_{\text{clustered}}$ (пунктирная линия). Порог η_0 – точка пересечения F_{random} и $1 - F_{\text{clustered}}$ (вертикальная чёрная линия)

Распределение расстояний от повторных толчков до триггеров

Рассмотрим распределение расстояний от триггеров (сейсмических событий или взрывов) до инициированных ими толчков. В работах [Huc, Main, 2003; Felzer, Brodsky, 2006; Richards-Dinger et al., 2010] было установлено, что в случае тектонических землетрясений расстояния от основных толчков до инициированных ими афтершоков (обозначим их через r), начиная с некоторого значения r_0 , подчиняются степенному распределению:

$$F_r(E) = P(r < x) = 1 - \left(\frac{x}{r_0}\right)^{1-n}, \quad x \geq r_0 \quad (4)$$

с плотностью:

$$f_r(x) = (n-1)r_0^{n-1}x^{-n}, \quad x \geq r_0. \quad (5)$$

Здесь n – параметр распределения, характеризующий наклон графика в логарифмическом масштабе по осям. Значение n не зависит от магнитуды основного толчка.

Оказалось, что распределение (4) справедливо и для сейсмичности Хибинского массива. В этом случае для эпицентральных расстояний от сейсмических событий-триггеров до инициированных ими толчков (рис. 3а): $r_0=0.134$ км, $n=2.27\pm 0.05$. Аналогичное распределение справедливо и для расстояний по глубине (рис. 3б): $h_0=0.06$ км, $n=2.28\pm 0.05$, где h_0 – значение абсолютной разности глубин, начиная с которого справедливо степенное распределение. Оценки

параметров выполнялись методом максимального правдоподобия по [Clauset et al., 2009].

Степенное распределение (4) также справедливо и для расстояний от взрывов-триггеров до инициированных ими сейсмических событий: для эпицентральных расстояний (рис. 4а) – $r_0=0.3$ км, $n=2.17\pm 0.02$; для расстояний по глубине (рис. 4б) – $h_0=0.15$, $n=3.37\pm 0.04$.

Обсуждение результатов и выводы

В работе было показано, что, как и в случае тектонических землетрясений, в условиях Хибинского массива распределение расстояний от триггеров (сейсмических событий или взрывов) до инициированных ими толчков подчиняется степенному распределению. Это говорит о том, что как в условиях тектонической сейсмичности, так и в техногенных обстановках афтершоковые процессы имеют одни и те же физические причины и, следовательно, могут описываться одними и теми же моделями. Один и тот же вид распределения для толчков, инициированных сейсмическими событиями и взрывами, указывает на отсутствие принципиальных различий в механизмах возникновения поствзрывной и постсейсмической активностей. Таким образом, есть основание полагать, что пространственное распределение повторных толчков определяется свойствами среды, а не способом её возмущения (сейсмическое событие или взрыв). Этот вывод позволяет использовать одни и те же модели для оценки опасности повторных толчков независимо от природы события-триггера.

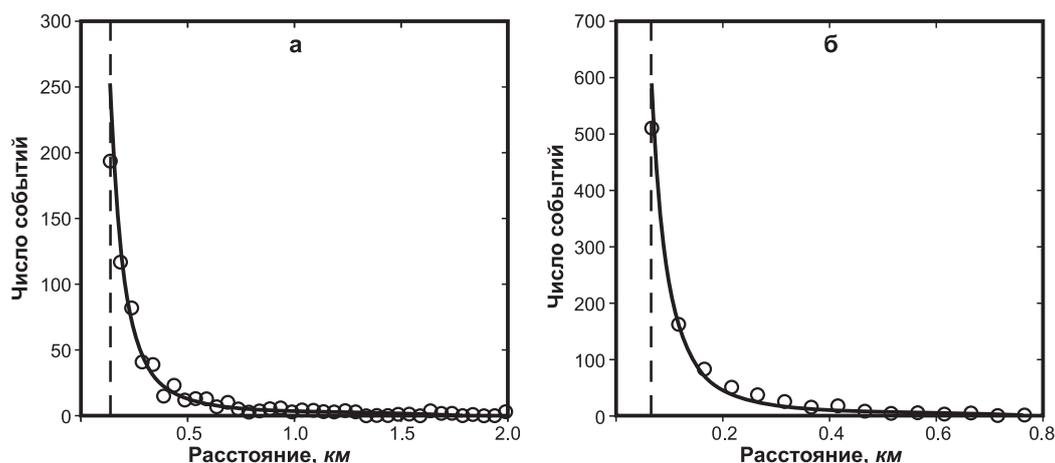


Рис. 3. Распределение эпицентральных расстояний (а) и расстояний по глубине (б) от сейсмических событий-триггеров с магнитудой $M_T \geq 1.5$ до инициированных ими толчков с магнитудой $M \geq M_T - 1.5$.

Кружки – фактические значения; сплошная линия – аппроксимация степенным распределением. Параметры для эпицентральных расстояний (а): $r_0=0.134$ км (вертикальная пунктирная прямая), $n=2.27\pm 0.05$; для расстояний по глубине (б): $h_0=0.06$ км (вертикальная пунктирная прямая), $n=2.28\pm 0.05$

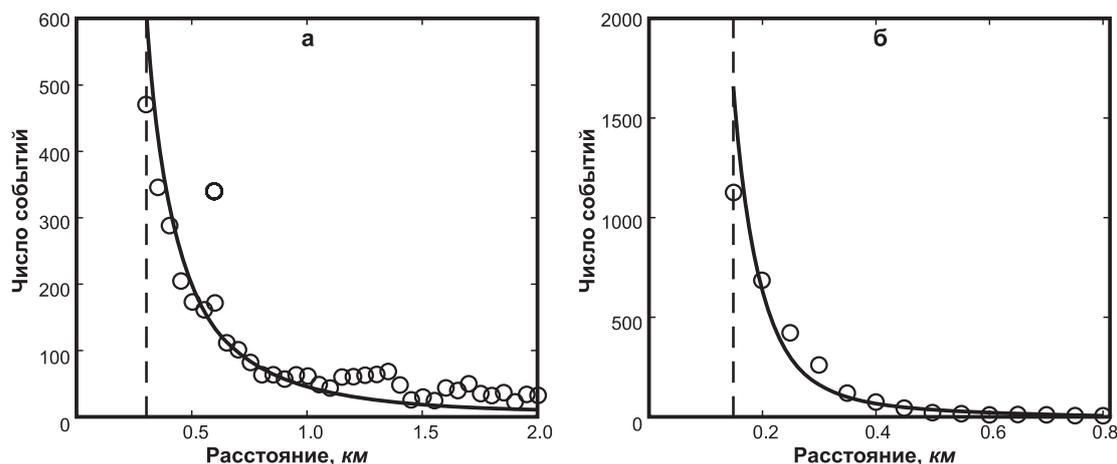


Рис. 4. Распределение эпицентральных расстояний (а) и расстояний по глубине (б) от взрывов-триггеров с магнитудой $M_T \geq 2$ до инициированных ими толчков с магнитудой $M \geq M_T - 2$.

Кружки – фактические значения; сплошная линия – аппроксимация степенным распределением. Параметры для эпицентральных расстояний (а): $r_0 = 0.3$ км (вертикальная пунктирная прямая), $n = 2.17 \pm 0.02$; для расстояний по глубине (б): $h_0 = 0.15$ км (вертикальная пунктирная прямая), $n = 3.37 \pm 0.04$

Физическая природа степенного пространственного спада афтершоков обсуждалась в работе [Felzer, Brodsky, 2006], где было высказано предположение, что наблюдаемое распределение обусловлено исключительно динамическим переносом напряжения, поскольку оказалось, что вероятность инициирования повторных толчков практически пропорциональна амплитуде сейсмических волн. Вместе с тем в [Richards-Dinger et al., 2010] было обнаружено, что степенное спадание по расстоянию имеет место и для афтершоков, произошедших до прихода сейсмической волны, что нарушает причинность. Таким образом, здесь нет оснований полагать, что динамический перенос напряжений вызывает повторные толчки.

Значения наклонов графика n определяют скорость пространственного затухания числа повторных толчков с увеличением расстояния до события-триггера. Используя полученные оценки и закон продуктивности, подтверждённый нами ранее для Хибинского массива [Баранов и др., 2019; 2020], можно построить усреднённую модель распределения расстояний, позволяющую оценить область, где с заданной вероятностью ожидаются повторные точки, инициированные сейсмическими событиями или взрывами. В этом случае в качестве модели области можно принять цилиндр, радиус и высота которого определяются, исходя из ожидаемого числа инициированных толчков, распределённых по пространству степенным образом.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01304-20 и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-00812).

Литература

- Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 22–44.
- Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Жирова А.М., Глазнев В.Н. Модель формирования Хибинско-Ловозерского рудоносного вулcano-плутонического комплекса // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55, № 5. – С. 397–414.
- Баранов С.В., Жукова С.А., Корчак П.А., Шебалин П.Н. Продуктивность техногенной сейсмичности // Физика Земли. – 2020. – № 3. – С. 40–51. doi: 10.31857/S0002333720030011
- Баранов С.В., Жукова С.А., Шебалин П.Н., Моторин А.Ю. О независимости сейсмической продуктивности от механизма возмущения среды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S37. – С. 333–342. doi: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-333-342
- Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 12. – С. 74–83. doi: https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.
- Козырев А.А., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Панин В.И., Федотова Ю.В., Константинов К.Н., Сальников И.В., Гадючко А.В., Белоусов В.В., Корчак П.А., Стрешнев А.А. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). –

- Апатиты: Горный институт КНЦ РАН; АО «Апатит», 2016. — 112 с.
- Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. — 2014. — № 10. — С. 42–46.
- Онохин Ф.М. Особенности структур Хибинского массива. — Л.: Наука, 1975. — 105 с.
- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical Review E. — 2004. — V. 69 (6). — P. 066106-1–066106-8. doi: 10.1103/PhysRevE.69.066106
- Bayliss K., Naylor M., Main I.G. Probabilistic identification of earthquake clusters using rescaled nearest neighbor distance networks // Geophysical Journal International. — 2019. — V. 217 (1). — P. 487–503.
- Clauset A., Shalizi C.R., Newman M.E.J. Power-Law distributions in empirical data // SIAM Review. — 2009. — V. 51, N 4. — P. 661–703. — URL: https://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0706/0706.1062v2.pdf
- Felzer K.R., Brodsky E.E. Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress // Nature. — 2006. — V. 441, Is. 7094. — P. 735–738.
- Huc M., Main I.G. Anomalous stress diffusion in earthquake triggering: correlation length, time dependence, and directionality: anomalous stress diffusion in earthquake triggering // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2003. — V. 108, B7. doi: 10.1029/2001JB001645
- Plenkens K., Kwiatak G., Nakatani M., Dresen G. & the JAGUARS Group. Observation of seismic events with frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng deep gold mine, South Africa // Seismological Research Letters. — 2010. — V. 81, N 3. — P. 467–479.
- Richards-Dinger K., Stein R.S., Toda S. Decay of aftershock density with distance does not indicate triggering by dynamic stress // Nature. — 2010. — V. 467 (7315). — P. 583–586.
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // Geophysical Journal International. — 2020. — V. 222, N 2. — P. 1264–1269.
- Vallejos J.A., Estay R.A. Seismic parameters of mining-induced aftershock sequences for Re-entry protocol development // Pure and Applied Geophysics. — 2018. — V. 175. — P. 793–811. doi: 10.1007/s00024-017-1709-5
- Vallejos J.A., McKinnon S.D. Omori's Law applied to mining-induced seismicity and Re-entry protocol development // Pure and Applied Geophysics. — 2010. — V. 167. — P. 91–106.
- Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behavior of seismic rock mass response to blasting // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2015. — V. 115, N 11. — P. 1045–1056.
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // Geophysical Journal International. — 2016. — V. 207. — P. 608–634.

Сведения об авторах

Баранов Сергей Владимирович, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Кольского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Апатиты, Россия. E-mail: bars.vl@gmail.com

Моторин Александр Юрьевич, ведущий геофизик Кировского филиала акционерного общества «Апатит» группы «ФосАгро» (КФ АО «Апатит»), г. Кировск, Россия. E-mail: AYuMotorin@phosagro.ru

Шебалин Пётр Николаевич, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: p.n.shebalin@gmail.com

On the spatial distribution of postseismic activity in the Khibiny Mountains

© 2020 S.V. Baranov¹, A.Yu. Motorin², P.N. Shebalin³

¹KoB GS RAS, Apatity, Russia; ²KB of Apatit, Kirovsk, Russia; ³IEPT RAS, Moscow, Russia

Abstract Using data on the seismicity of the Khibiny Mountains, it was shown that the distances from seismic events triggered by an earlier seismic event to their triggers obey a power-law distribution with a parameter independent of the magnitude of the trigger event. It was previously shown by Felzer & Brodsky [2006], Richards-Dinger et al. [2010] that the same distribution is appropriate for tectonic seismicity. Additionally, in the present paper, it was shown that in the Khibiny Mountains, the distribution of distances from seismic events to triggering explosions is also power-law. Thus, the power-law character of the spatial distribution of post-seismic activity takes place both for tectonic and mining-induced seismicity. The same type of distribution for postseismic and post blasting activities in Khibiny Mountains gives a reason to suppose that the spatial distribution is determined by the features of the rock and does not depend on the mechanism of its perturbation (seismic event or explosion). The use of these features and the previously established laws of earthquake productivity, verified for mining-induced seismicity, and seismic productivity of explosions, allows evaluating the zone where repeated events are expected with a given probability.

Keywords Khibiny Mountains, seismic events, explosions, aftershocks, spatial distribution.

For citation Baranov, S.V., Motorin, A.Yu., & Shebalin, P.N. (2020). [On the spatial distribution of postseismic activity in the Khibiny Mountains]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(3), 34-42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.03>

References

- Adushkin, V.V. (2016). Tectonic earthquakes of anthropogenic origin. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 52(2), 173-194.
- Arzamastsev, A.A., Arzamastseva, L.V., Zhirova, A.M., & Glaznev, V.N. (2013). Model of formation of the Khibiny-Lovozero ore-bearing volcanic-plutonic complex. *Geology of Ore Deposits*, 55(5), 341-356.
- Baiesi, M., & Paczuski, M. (2004). Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Physical Review E*, 69(6), 066106-1 - 066106-8. doi: 10.1103/PhysRevE.69.066106
- Baranov, S.V., Zhukova, S.A., Korchak, P.A., & Shebalin, P.N. (2020). Productivity of Mining-Induced Seismicity. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 56(3), 326-336.
- Baranov, S.V., Zhukova, S.A., Shebalin, P.N., & Motorin, A.Yu. (2019). [On the independence of seismic productivity from the mechanism of rock perturbation]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mountain Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 537, 333-342. (In Russ.).
- Bayliss, K., Naylor, M., & Main, I.G. (2019). Probabilistic identification of earthquake clusters using rescaled nearest neighbor distance networks. *Geophysical Journal International*, 217(1), 487-503.
- Clauset, A., Shalizi, C.R., & Newman, M.E.J. (2009). Power-Law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), 661-703. Retrieved from: https://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0706/0706.1062v2.pdf
- Felzer, K.R., & Brodsky, E.E. (2006). Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress. *Nature*, 441(7094), 735-738.
- Huc, M., & Main, I.G. (2003). Anomalous Stress Diffusion in Earthquake Triggering: Correlation Length, Time Dependence, and Directionality: Anomalous Stress Diffusion in Earthquake Triggering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B7). doi: 10.1029/2001JB001645
- Korchak, P.A., Zhukova, S.A., & Menshikov, P.Yu. (2014). [Formation and development of a system for monitoring seismic processes in the production area of Apatit JSC]. *Gornyj zhurnal* [Mining Journal], 10, 42-46. (In Russ.).
- Kozyrev, A.A., Semenova, I.E., Rybin, V.V., Panin, V.I., Fedotova, Yu.V., Konstantinov, K.N., Salnikov, I.V., Gadyuchko, A.V., Belousov, V.V., Korchak, P.A., & Streshnev, A.A. (2016). *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na mestorozhdeniyah, sklonnyh i opasnyh po gornym udaram (Hibinskie apatit-nefelinovye*

- mestorozhdeniya*) [Guidelines for the safe conduct of mining operations in deposits prone and dangerous in mountain impacts (Khibiny apatite-nepheline deposits)]. Apatity, Russia: Mining Institute KSC RAS Publ., Apatit JSC Publ., 112 p. (In Russ.).
- Kozyrev, A.A., Semenova, I.E., Zhuravleva, O.G., & Panteleev, A.V. (2018). [The hypothesis of the origin of a strong seismic event at the Rasvumchorr mine 01/09/2018]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mountain Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 12, 74-83. (In Russ.).
- Onokhin, F.M. (1975). *Osobennosti struktur Hibinskogo massiva* [Features of the structures of the Khibiny mountains]. Leningrad, Russia: Nauka Publ., 105 p. (In Russ.).
- Plenkers, K., Kwiatek, G., Nakatani, M., & Dresen, G. (2010). Observation of seismic events with frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng deep gold mine, South Africa. *Seismological Research Letters*, 81(3), 467-479.
- Richards-Dinger, K., Stein, R.S., & Toda, S. (2010). Decay of aftershock density with distance does not indicate triggering by dynamic stress. *Nature*, 467(7315), 583-586.
- Shebalin, P.N., Narteau, C., & Baranov, S.V. (2020). Earthquake productivity law. *Geophysical Journal International*, 222(2), 1264-1269.
- Vallejos, J.A., & Estay, R.A. (2018). Seismic parameters of mining-induced aftershock sequences for Re-Entry protocol development. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 793-811. doi: 10.1007/s00024-017-1709-5
- Vallejos, J.A., & McKinnon, S.D. (2010). Omori's law applied to mining-induced seismicity and Re-entry protocol development. *Pure and Applied Geophysics*, 167, 91-106.
- Woodward, K., & Wesseloo, J. (2015). Observed spatial and temporal behavior of seismic rock mass response to blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(11), 1045-1056.
- Zaliapin, I., & Ben-Zion, Y. (2016). A global classification and characterization of earthquake clusters. *Geophysical Journal International*, 207, 608-634.

Information about authors

- Baranov Sergey Vladimirovich**, Dr., Leading Researcher of the Kola Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KoB GS RAS), Apatity, Russia. E-mail: bars.vl@gmail.com
- Motorin Alexander Yurievich**, Leading Geophysicist of the Kirovsk Branch of the Apatit of PhosAgro (KB of Apatit), Kirovsk, Russia. E-mail: AYuMotorin@phosagro.ru
- Shebalin Peter Nikolaevich**, Corresponding Member of RAS, Dr., Director of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences (IEPT RAS), Moscow, Russia. E-mail: p.n.shebalin@gmail.com