

Рис. 2. Гистограммы распределения сопротивления третьего слоя для первого (а) и второго (б) типа помех

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-35-00320.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанные вероятностно-детерминистские методы решения линейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии // Геофизика. – 2011. – № 2. – С. 20-29.
2. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки // Докл. Акад. наук. – 2011. – Т. 438, № 4. – С. 532-537.
3. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В., Тайницкий А.А., Христенко Л.А. Подавление знакопеременных помех при инверсии данных вертикального электрического зондирования // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2016. – Вып. 2 (31). – С. 55-63.
4. Тайницкий А.А. Применение метода минимизации эмпирического риска при интерпретации данных ВЭЗ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 243-246.
5. Тайницкий А.А. Решение обратной задачи ВЭЗ методом минимизации эмпирического риска для группы зондирований // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – С. 230-232. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.63.
6. Тайницкий А.А., Кичигин А.В. Интерпретация данных электроразведки методом минимизации эмпирического риска // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию Первой Всесоюз. геофизич. конф. / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2017. – С. 191-195.
7. Тайницкий А.А., Кичигин А.В. Решение обратной задачи ВЭЗ в условиях интенсивных знакопеременных помех // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: сб. науч. тр. Вып. 1 (6) / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2018. – С. 286-290.

УДК 550.34

DOI:10.7242/echo.2019.4.14

### ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В РАЙОНЕ АВАРИЙНОГО УЧАСТКА РУДНИКА СКРУ-2

Д.Ю. ШУЛАКОВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** На основании анализа большого объема натуральных сейсмологических наблюдений, связанных с аварийными ситуациями на рудниках ВКМКС, установлено, что микросейсмическая активность, сопровождающая рост карстовых провалов, носит импульсный либо волнообразный характер. Показано, что использование графиков повторяемости сейсмических событий применительно к техногенным карстовым процессам не только возможно, но и позволяет получить дополнительную информацию о внутренней структуре сейсмического процесса. На основании их анализа выяснено, что, в отличие

от тектонических землетрясений, самоподобие сейсмического процесса в области сильных событий сильно ограничено, что обуславливается самой природой формирования микросейсмической активности. Также установлено, что графики повторяемости имеют существенно различный характер на ранней и конечной стадиях формирования карстового провала.

**Ключевые слова:** аварийная ситуация, сейсмологический мониторинг, микросейсмическая активность, карст, график повторяемости

## **Введение**

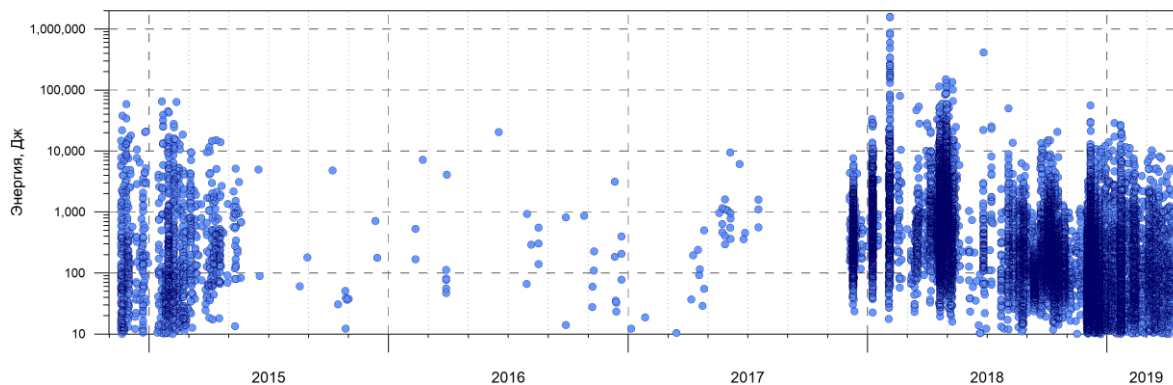
Сейсмологические наблюдения являются одним из важных компонентов мониторинга аварийных и потенциально опасных зон на территории Верхнекамского месторождения калийных солей. Они обеспечивают непрерывные в пространстве и времени наблюдения на достаточно больших участках территории – от сотен тысяч м<sup>2</sup> до десятков км<sup>2</sup>. Как показал опыт мониторинговых наблюдений, одной из характерных особенностей микросейсмической активности на аварийных участках является крайне высокая изменчивость процесса как в пространстве, так и по времени. Вполне очевидным фактом является то, что подобная изменчивость является непосредственным следствием динамики процессов формирования карстовой полости или провала. В то же время, регистрируемая микросейсмическая активность характеризуется определенной внутренней структурой, которая может дать дополнительную информацию о параметрах процессов разрушения и характеристиках геологической среды в районе проведения мониторинга. Одним из основных параметров, характеризующих особенности сейсмического процесса, является закон (или график) повторяемости, отражающий фрактальные свойства сейсмической активности. Целью данного исследования является анализ особенностей графика повторяемости сейсмических событий для различных аварийных участков на Верхнекамском месторождении.

## **Особенности динамики микросейсмической активности в районе аварийной зоны рудника СКРУ-2**

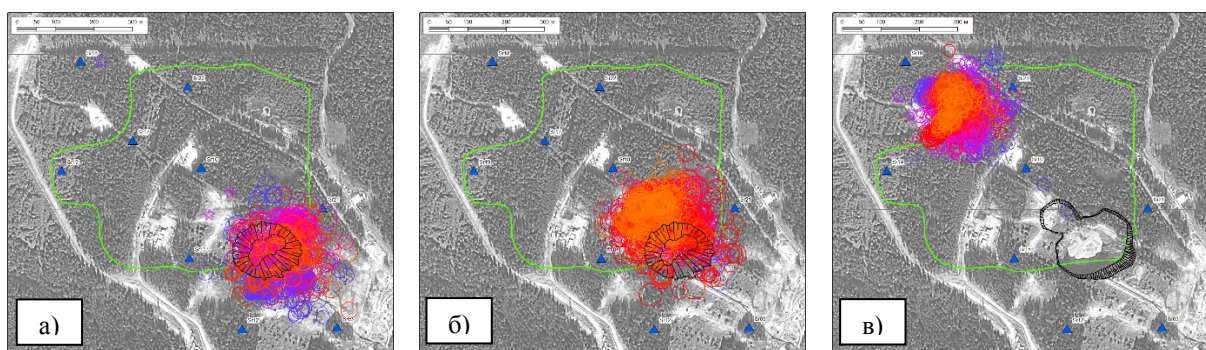
Режимные мониторинговые наблюдения с использованием локальной сети в районе аварийного участка рудника СКРУ-2 были начаты 19 ноября 2014 г., спустя сутки после формирования провала на земной поверхности [1]. За прошедшее с тех пор время было зарегистрировано свыше 13 500 сейсмических событий с энергией от единиц Дж до 1500 кДж. Характерной особенностью микросейсмической активности является ее крайняя неравномерность как по времени, так и в пространстве. На рис. 1 представлен график, отражающий временную динамику микросейсмической активности в пределах контролируемой территории. Каждая точка на этом графике соответствует отдельному сейсмическому событию. Можно заметить, что в течение первых месяцев после образования воронки, когда шел ее активный рост, уровень микросейсмической активности был очень высоким: ежедневно регистрировалось до нескольких десятков сейсмических событий. Однако начиная с мая 2015 г. интенсивность сейсмических процессов значительно снизилась, в период с июня 2015 г. по ноябрь 2017 г. регистрировалось от единиц до первых десятков событий в месяц. Эта ситуация резко изменилась в декабре 2017 г., когда произошло практически мгновенное возрастание уровня микросейсмической активности. Характерной ее особенностью была значительная неравномерность во времени – сейсмические события происходили преимущественно в виде кратковременных (от нескольких часов до первых суток) и очень интенсивных (сотни событий) серий.

Второй особенностью является пространственная неравномерность распределения эпицентров регистрируемых событий и их миграция с течением времени. Наиболее ярко это иллюстрируется картами, представленными на рис. 2.

Как видно из представленных карт, зимой 2017 – 2018 годов (начало активизации) большинство эпицентров располагалось в районе восточного и северо-восточного бортов воронки. Наблюдаемая микросейсмическая активность ассоциировалась, судя по всему, с выполаживанием этих бортов, а также с подвижками в глиняной смеси, которая засыпалась в воронку в рамках работ по ликвидации аварийной ситуации. В апреле 2018 г. ситуация существенно изменилась: максимум микросейсмической активности начал наблюдаться к северо-западу от провала. Уровень активности в этой зоне волнообразно нарастал и 2 мая там сформировалась новая карстовая воронка. После ее формирования произошло значительное снижение как количества регистрируемых событий, так и их энергии.



**Рис. 1.** Временная динамика микросейсмической активности в районе провала на руднике СКРУ-2 в 2014 – 2019 гг.



**Рис. 2.** Карты эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных в период с декабря 2017 г. по март 2018 г. (а), с апреля по май 2018 г. (б) и с декабря 2018 г. по март 2019 г. (в)

Следующий всплеск микросейсмической активности произошел в декабре 2018 г., причем сейсмические события начали регистрироваться в северо-западной части контролируемой территории, где ранее заметных проявлений сейсмоактивности не наблюдалось (рис. 2в). Большая часть сейсмических событий здесь также происходила в виде кратковременных интенсивных серий, максимальный уровень сейсмоактивности превышал 800 событий в сутки, а суточное выделение сейсмической энергии достигало 700 кДж.

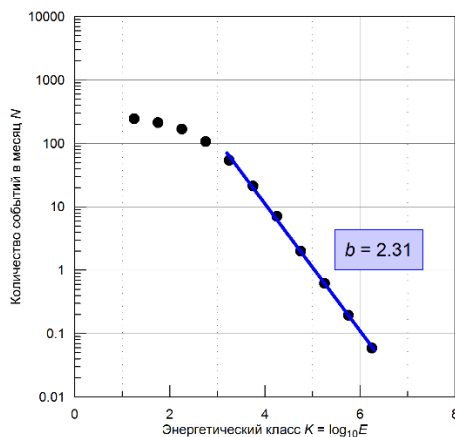
В процессе обработки было отмечено, что в разные периоды времени даже в пределах одной сейсмоактивной зоны наблюдается разное соотношение количества крупных и мелких сейсмических событий. В связи с этим было принято решение более детально проанализировать внутреннюю структуру сейсмического процесса.

### Анализ графиков повторяемости сейсмических событий

Достаточно давно рядом исследователей установлено, что сейсмический процесс обладает фрактальными свойствами, то есть проявляет характерные свойства иерархической самоподобной системы в распределении землетрясений в пространстве, во времени и по энергии. Наиболее четко и наглядно это было показано в середине XX века в работе Б. Гутенберга и Ч. Рихтера [2]. Они установили, что распределение числа землетрясений по магнитуде(энергии) описывается степенной функцией. Эта зависимость получила название «закон Гутенберга-Рихтера», а график, построенный в двойных логарифмических координатах, – «график повторяемости землетрясений». Применительно к энергетическому классу землетрясений  $K$  закон Гутенберга-Рихтера может быть записан следующей формулой:

$$\log_{10}N = a - bK, \quad (1)$$

где  $N$  – количество землетрясений с энергетическим классом  $>K$ ,  $a$  и  $b$  – константы. В ходе исследований было установлено, что константы  $a$  и  $b$  отражают особенности сейсмического режима в данном конкретном месте за определенный промежуток времени, и не являются постоянными даже для одного сейсмоактивного региона. Особый интерес для анализа сейсмической активности представляет величина  $b$ , определяющая угол наклона графика повторяемости, т.е. пропорцию между количеством слабых и сильных сейсмических событий. В зависимости от тектонической обстановки, коэффициент  $b$  может принимать разные значения: от 0.9 для платформенных регионов до 3.6 для срединно-океанических хребтов.

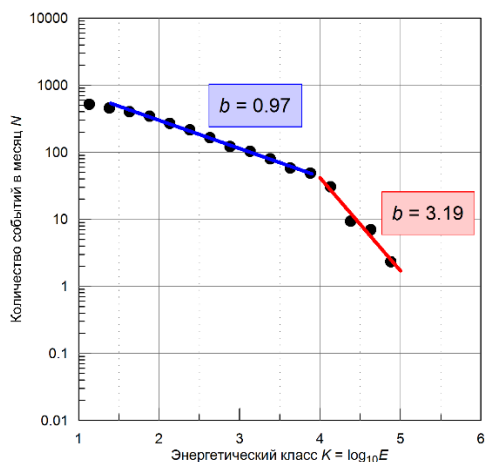


**Рис. 3.** График повторяемости сейсмических событий в районе аварийного участка за весь период наблюдений

Необходимо отметить, что закон Гутенберга-Рихтера был установлен для тектонических землетрясений, и применимость его для процессов, связанных с формированием карстовых провалов на аварийных участках, потребовала дополнительной проверки. На рис. 3 представлен график повторяемости, рассчитанный по всему каталогу сейсмических событий за 2014 – 2019 гг. Как видно из него, в диапазоне энергетических классов 3.2 ... 6.2 наблюдается практически идеальное соответствие распределение количества и энергии сейсмических событий экспоненциальному закону.

Наблюдаемый в левой части «завал» означает, что чувствительность мониторинговой системы недостаточна, и часть событий с низкой энергией пропускается. Однако начиная с энергетического класса  $K=3.5$  сейсмические события регистрируются представительно, т.е. без пропусков. Также следует обратить внимание на отсутствие крупных событий в правой части графика – за все время проведения наблюдений не зарегистрировано ни одного события с энергетическим классов выше, чем 6.2. Судя по всему, это ограничение связано непосредственно с процессами, вызывающими микросейсмическую активность: физико-механические свойства пород не позволяют сформироваться настолько большой полости, чтобы ее обрушение вызвало событие с энергией существенно выше 1000 кДж.

Таким образом, убедившись, что закон повторяемости сейсмических событий справедлив и для микросейсмической активности в пределах аварийного участка, можно выполнить анализ внутренней структуры сейсмичности более детально.



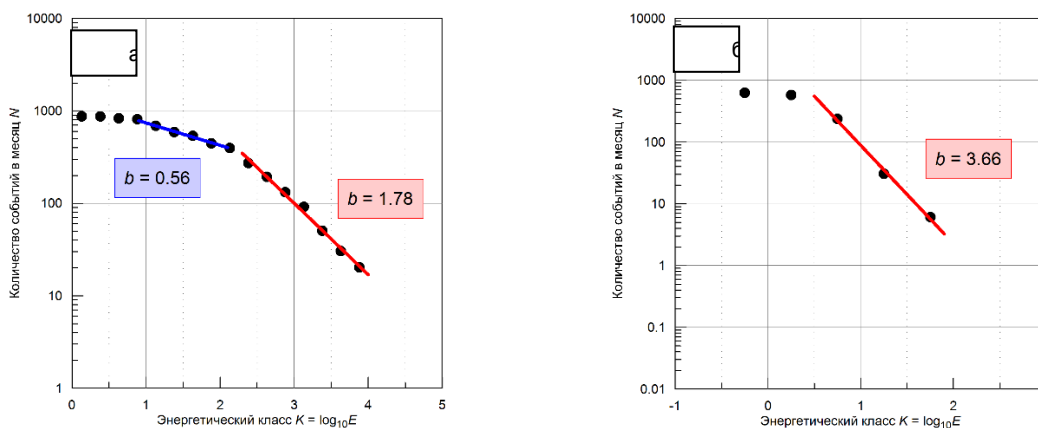
**Рис. 4.** График повторяемости сейсмических событий с 19 ноября по 1 декабря 2014 г.

В первую очередь был рассчитан график повторяемости для микросейсмической активности в первые дни после образования провала на руднике СКРУ-2 (рис. 4). Оказалось, что он имеет ярко выраженный бимодальный характер. Для слабых сейсмических событий ( $K < 4$ ) угол наклона значительно более пологий, чем для более крупных. Это говорит о том, что в данном случае наблюдаются сейсмические события, связанные с двумя разными процессами. Можно предположить, что слабые события – это осыпания стенок воронки, более крупные – просадки глинистого материала на ее дне. Аналогичный характер имели графики повторяемости, рассчитанные для периодов сейсмической активизации в те-

чение нескольких последующих месяцев.

Для проверки гипотезы о связи бимодального характера графика повторяемости с развитием уже сформировавшейся карстовой воронки были проанализированы каталоги, полученные при мониторинге провала на руднике БКПРУ-1 [3] и при наблюдениях временной локальной сетью за 2 месяца до образования провала на руднике СКРУ-2 [1] (рис. 5).

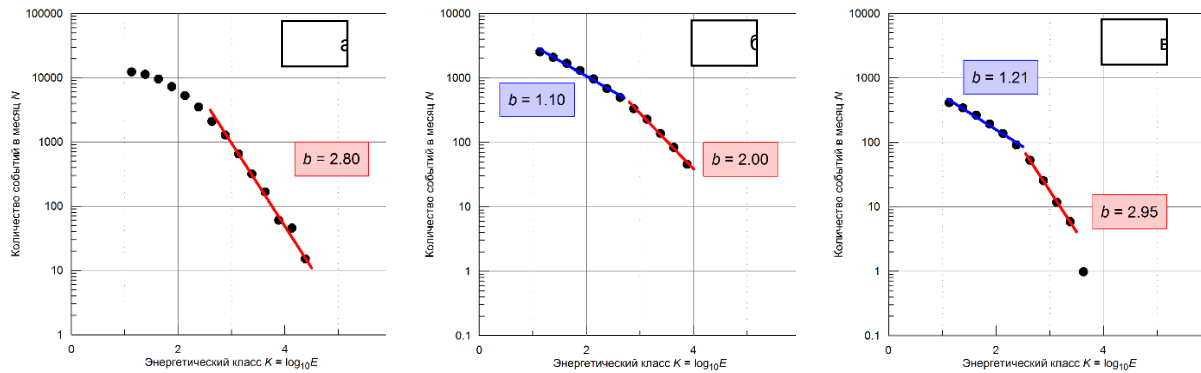
Как видно из представленных графиков, на руднике БКПРУ-1 после образования карстовой воронки график повторяемости также носил четко выраженный бимодальный характер. На руднике СКРУ-2 на начальной стадии формирования карстовой полости (под землей), напротив, график повторяемости имел более традиционный вид, причем его наклон соответствовал правой, более крутой ветви, ассоциируемой с подвижками рыхлых пород на дне карстового провала.



**Рис. 5.** Графики повторяемости сейсмических событий:  
(а) – за период с 29 по 31 июля 2007 г. в районе провала на руднике БКПРУ-1;  
(б) – в сентябре 2014 г. в районе формирования провала на руднике СКРУ-2

В связи с вышеизложенным, значительный интерес представляет анализ микросейсмической активности в северо-западной части опасной зоны на руднике СКРУ-2 (рис. 2в). На рис. 6 представлены графики повторяемости для трех наиболее характерных периодов.





**Рис. 6.** Графики повторяемости сейсмических событий в северо-западной части опасной зоны за 7 декабря 2018 г. (а), 21-24 января 2019 г. (б) и марта – 8 апреля 2019 г. (в)

Как видно из этих графиков, в течение первых дней после формирования новой сейсмоактивной зоны график повторяемости имел «классический» вид, при этом значение параметра  $b$  было очень высоким и соответствовало крутой «высокоэнергетичной» ветви бимодального графика. Однако уже в январе 2019 г. на графике повторяемости наметился «перелом», и совершенно явно выраженным он стал весной этого года. Надо отметить, что, несмотря на структуру сейсмоактивности, характерную для сформировавшегося провала, никаких проявлений процесса разрушения на земной поверхности в пределах данной сейсмоактивной зоны не появилось. Можно предположить, что первоначально карстовая полость сформировалась в хорошо растворимых породах (солях), после чего началось ее «всплывание», сопровождающееся постепенным заполнением рыхлыми обломочными материалами. И процесс заполнения завершился раньше, чем данная полость смогла дорасти до земной поверхности.

### Выводы

1. Установлено, что временная динамика микросейсмической активности, связанной с процессами формирования техногенных карстовых провалов на территории ВКМКС, носит импульсный или волнообразный характер.
2. Для регистрируемой микросейсмической активности прослеживается достаточно жесткое ограничение максимальной энергии событий, связанное с размерами карстовой полости, генерирующей данные события.
3. Показано, что в целом подобная микросейсмическая активность подчиняется закону Гутенберга-Рихтера, однако угол наклона графика повторяемости может отличаться от такового для тектонических землетрясений. Кроме того, во многих случаях график повторяемости имеет бимодальный характер, то есть состоит из двух частей, имеющих разный угол наклона.
4. Для сформировавшихся карстовых воронок график повторяемости носит бимодальный характер, что говорит о наличии двух разных процессов, сопровождающихся генерацией сейсмических событий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шулаков, Д.Ю., Варлашова Ю.В. Сейсмологический мониторинг развития аварийной ситуации на руднике СКРУ-2 // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Десятой Междунар. сейсмологич. шк. / ГС РАН. – Обнинск, 2015. – С. 368-372.
2. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. – 2nd ed. – Princeton: Princeton University Press, 1954. – 284 p.
3. Malovichko, D.A., Kadebskaya, O.I., Shulakov, D.Y., Butyrin, P.G. Local seismologic observations of karst processes // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2010. – V. 46, № 1. – P. 57-73. DOI: 10.1134/S1069351310010052.