ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(4):56-66
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.83+550.34.01 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_56

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Т.В. Злобина[1], Р.А. Дягилев[2]

[1] Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия,
e-mail: arc@mi-perm.ru
[2] Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН»
(ФИЦ ЕГС РАН), Обнинск, Россия

Аннотация: Промышленная отработка Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) ведется с 1934 г. 5 января 1995 г. на данной территории произошло техногенное землетрясение, эпицентр которого находился в северо-восточной части второго соликамского рудника. Событие дало толчок к развитию сейсмологических наблюдений на рудниках месторождения. Более чем двадцатилетние сейсмологические наблюдения показывают, что пространственно-временные изменения сейсмичности связаны с используемыми горнотехническими параметрами отработки. Представлена многофакторная прогностическая модель, характеризующая последствия отработки месторождения, и возникновение в результате работ сейсмической активности на территории. Выполнена параметризация математической модели с использованием новых, ранее не привлеченных для статистики данных с 2018 по 2021 гг. для рудника СКРУ-2. Выполнен расчет карт фактического и модельного значения сейсмического энерговыделения для 2019 г. При сравнении данных карт установлено, что основные зоны с повышенными значениями этого параметра совпадают. Наилучшую корреляцию показало сглаженное сейсмическое поле, при этом коэффициент корреляции растров достиг значения 0,46. Также было произведено вычисление прогнозной модели для одного из рудников Верхнекамского месторождения на 2022 г. Таким образом, выбранная многофакторная модель показала свою пригодность для прогноза сейсмической активности в калийных рудниках.

Ключевые слова: калийный рудник, сейсмологический мониторинг, техногенная сейсмичность, многофакторная математическая модель, горнотехнические параметры отработки, пространственный анализ, коэффициент корреляции, верификация, прогнозирование.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.

Для цитирования: *Злобина Т. В., Дягилев Р. А.*Апробация метода прогноза сейсмической активности для Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 56–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_56.

© Т.В. Злобина, Р.А. Дягилев. 2022.

Testing of seismic activity prediction method at the Upper Kama Potash Deposit

T.V. Zlobina[1], R.A. Dyagilev[2]

[1] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: arc@mi-perm.ru

[2] Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia

Abstract: Commercial production of potash at the Upper Kama deposit started in 1934. On January 5, 1995 an induced earthquake took place in that area, with the source site in the north-east of Solikamsk 2 mine field. The incident motivated initiation of seismic monitoring in the local mines. The data of seismic monitoring for more than 20 years show that the time-space variations in seismicity are connected with the geotechnical parameters of mining. This article describes a multi-factor prediction model which characterizes effects of mining operations and the induced seismic activity. Parametrization of the mathematical model uses new, previously left aside statistics on Solikamsk 2 Mine between 2018 and 2021. Mapping of the actual and model seismic energy release is carried out for 2019. The comparison of the mapping data shows a coincidence of the zones of the increased seismic energy emission. The smoothed seismic field provides the best correlation, while the correlation factor of the raster patterns reaches 0.46. Furthermore, the prediction modeling was undertaken as a case-study of an operating mine at the Upper Kama deposit for 2022. Finally, the proposed multi-factor model has proved its appropriateness for the seismic activity prediction in potassium mines.

Key words: potassium mine, seismic monitoring, induced seismicity, multi-factor mathematical model, geotechnical parameters of mining, spatial analysis, correlation factor, verification, prediction.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of State Contract No. 075-03-2021-374 dated December 29, 2020

For citation: Zlobina T. V., Dyagilev R. A. Testing of seismic activity prediction method at the Upper Kama Potash Deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(4):56-66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_56.

Введение

Проявление индуцированной сейсмичности на рудниках и шахтах в виде горных ударов и техногенных землетрясений является одним из ключевых аспектов, который требует решения при разработке месторождений полезных ископаемых. Данная проблема актуальна для ряда регионов России, а также для многих месторождений мира. Одним из острых вопросов стала возможность прогноза неблагоприятных динамических явлений на рудниках для проведения эффективных профилактических мероприятий по их предотвращению. Прогноз является сложной задачей и часто носит качественный характер, также на каждом месторождении есть своя специфика проявления индуцированной сейсмичности. Такая проблема связана с механизмами возникновения техногенных землетрясений, с различием упругих и деформационных свойств горных пород, с многочисленными особенностями и

причинами возникновения динамических явлений и трудностью математического описания [1].

В работе [2] утверждается, что прогноз и предотвращение горных ударов и техногенных землетрясений должны основываться не на отдельных эпицентрах, а на районировании территории и выделении наиболее опасных участков отработки. Различные исследования [3—7] показывают, что каждое месторождение уникально, проявления горного давления на горнодобывающих объектах отличаются, а используемые методы изучения и исследования неповторимы даже на разных рудниках одного месторождения. Из-за различий в проявлении сейсмичности и большого количества влияющих факторов на сегодняшний день нет единых стандартов прогноза сейсмической активности на шахтах и рудниках. Так, в работе [8] применяется пространственно-временной иерархический кластерный анализ для управления рисками на угольных шахтах. Для каменноугольных шахт Верхнесилезского угольного бассейна в Польше была установлена взаимосвязь сейсмичности с параметрами отработки [9], которая используется для дальнейшей корректировки отработки угля. В Китае [10] на месторождении Синьчжоу используется целый мониторинговый комплекс для исследования и раннего предупреждения горных ударов при многопластовой отработке угольных пластов. Отдельно следует выделить изучение механизмов сейсмических техногенный событий. Данные исследования [11] позволяют более детально посмотреть на параметры и причины очага землетрясения. Необходимо отметить, что многие влияющие факторы являются латентными и сложно изучаемыми. Как следствие, появляется трудность их учета при анализе и прогнозе динамических явлений на рудниках. Поэтому необходимо изучать и проверять многие факторы, разделять их по возможности и эффективности в задаче прогнозирования и выделения сейсмоопасных зон.

Сейсмическая активность на ВКМКС

Разработка Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) может приводить к деформациям земной поверхности, к обрушениям кровли выработок, к появлению техногенных землетрясений. Это связано с различными аспектами отработки месторождения, со сложными геологическими условиями, с физико-механическими свойствами калийных руд. В 1995 г. после Соликамского землетрясения были установлены первые сейсмические станции в горных выработках. С 1995 г. по настоящее время локальной сетью сейсмомониторинга зарегистрировано более 13 тыс. событий различной природы. Основная доля локальных событий связана с медленными деформациями калийных солей, которые приводят к обрушениям кровли горных выработок. Необходимо отметить, что ВКМКС не является удароопасным из-за высокой пластичности калийных и каменных солей. В этом случае сейсмичность не представляет угрозы сама по себе, но является индикатором возникновения неблагоприятных и/или потенциально опасных горнотехнических условий.

В работах [12—14] проанализированы факторы, которые оказывают влияние на уровень микросейсмической активности на рудниках Верхнекамского месторождения. Выделены и описаны такие факторы, как удаленные землетрясения, взрывные работы, возраст горных выработок, количество отработанных пластов, наличие, возраст и тип закладочного материала, геометрические параметры камеры. Данные исследования показали, что выделенные факторы

имеют различный вес, и не всегда есть возможность включать их в учет при последующем прогнозе сейсмической активности.

Рассматривая роль удаленных землетрясений в проявлении микросейсмической активности на рудниках, можно отметить, что данный фактор имеет влияние на всю площадь шахтного поля. Влияние землетрясений с M ⩾ 5 заключается в их способности «встряхнуть» подработанный массив и ускорить сейсмический процесс в ~1,7 раза. Но необходимо отметить, что далее происходит постепенное затухание сейсмичности до фонового уровня в течение 3 сут. Данный фактор непросто использовать при прогнозе сейсмической активности, это связано с незнанием заранее времени и силы крупного землетрясения. Фактор взрывных работ на руднике также показал низкую практическую значимость из-за локального характера (отмечено его влияние на малой площади в течение очень короткого временного интервала), что не дает возможности учитывать его в многофакторной модели прогноза. Наибольший вес в прогностической модели приобретают горнотехнические параметры отработки. Они охватывают значительные площади и действуют годами. Среди горнотехнических факторов необходимо выделить возраст выработки, количество отработанных пластов, наличие, тип и срок, прошедший после закладочных работ. В числе таковых можно отметить фактор ширины и высоты горных выработок. Но в работе [10] показано, что этот фактор влияет только на события типа «обрушения», которые составляют примерно 10% из всех, что недостаточно для включения его в группу значимых прогностических параметров.

Таким образом, для дальнейшего прогноза сейсмической активности использовались факторы: возраст горных выработок при различных сочетаниях пластов, тип и срок давности закладочных работ. В работе [12] представлена верификация модели прогноза уровня сейсмической активности в калийных рудниках. Согласно данной работе, величина прогнозируемого уровня сейсмической активности на руднике в момент времени t в каждой точке шахтного поля при наличии нескольких значимых факторов будет определяться произведением:

$$P(t) = P_0 \cdot \prod_{i=1}^{n} U_i(t, t_i), \qquad (1)$$

где P_0 — максимальный уровень параметра плотности выделения сейсмической энергии, определяемого для каждого сочетания разрабатываемых пластов; $U_i(t, t_{0i})$ — функция, описывающая относительные изменения влияния i-го фактора во времени, нормированная на диапазон от 0 до 1; t — момент времени, для которого рассчитывается модельное значение (измеряется в годах); t_{0i} — момент начала действия i-го фактора.

Ранее произведенные расчеты показали [12], что в прогностическую многофакторную модель необходимо включать сочетания двух основных зависимостей: возраст горных выработок, который уже включает зависимость количества разрабатываемых пластов, а также возраст и тип закладочного материала. Ретроспективно такое моделирование сейсмичности на рудниках ВКМКС выявило подобие прогнозных и фактических карт сейсмической активности. Это выразилось в совпадении зон с повышенными значениями прогностического параметра на существенной площади рудников, а также в приемлемых значениях коэффициента корреляции растров, рассчитанных за один период времени. Необходимо отметить, что максимальную схожесть показало сглаженное сейсмическое поле, которое нивелирует влияние множества случайных и трудноучитываемых факторов. Исходя из этого, был

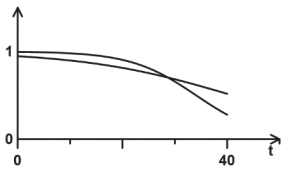
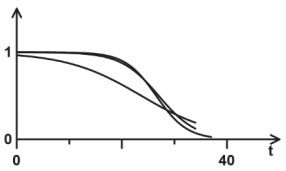
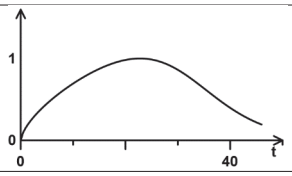
сделан вывод, что используемая модель для прогноза сейсмической активности на рудниках ВКМКС обеспечивает надежный прогноз на период до 2 лет вперед. Данные исследования были протестированы для сейсмических и горнотехнических данных по состоянию на 2014 г. [12]. Поэтому для более точного прогноза сейсмической активности на руднике СКРУ-2 Верхнекамского месторождения на ближайший 2022 г. необходимо обновить данные по влияющим факторам, уточнить параметры полученных зависимостей и произвести новый расчет прогностической карты плотности выделения сейсмической энергии для выбранной территории.

Обновление данных для прогноза сейсмической активности

Для расчета показателей математической модели влияния техногенных факторов для рудника СКРУ-2 обновлялись горнотехнические и сейсмические данные (актуальность на октябрь 2021 г.). Порядок вычисления предложен в работах [12 — 14]. В качестве сейсмического параметра были взяты растры плотности выделения сейсмической энергии с 2000 по 2020 гг., для пространственного анализа применялся метод зональной статистики, территория шахтного поля была ограничена областью с достаточной для таких исследований плотностью сейсмических событий (5 событий в окружности с радиусом 1 км).

Актуализированные значения параметров математической модели техногенных факторов для рудника СКРУ-2 по данным 2000 — 2020 гг. представлены в таблице (значения времени t заданы в годах). Таким образом, ожидается, что обновленные зависимости описывают процесс сейсмического энерговы-

Параметры математической модели техногенных факторов для рудника СКРУ-2 по данным 2000—2020 гг.
Parameters for mathematical model of man-made factors for Solikamsk 2 mine by 2000–2020 data

Фактор	Пласт	P_0, Дж/м^2	$U(t, t_0)$	График $U(t, t_0)$
Сухая закладка	КрII	$3{,}41\cdot10^{-2}$	$\frac{1}{1+e^{(-5{,}45+0{,}16\cdot(t-t_0))}}$	
	АБ	$4{,}21\cdot10^{-2}$	$\frac{1}{1+e^{(-2{,}87+0{,}07\cdot(t-t_0))}}$	
Гидравлическая закладка	КрII	$2{,}99\cdot10^{-2}$	$\frac{1}{1+e^{(-7{,}56+0{,}28\cdot(t-t_0))}}$	
	АБ	$3{,}72\cdot10^{-2}$	$\frac{1}{1+e^{(-3{,}32+0{,}14\cdot(t-t_0))}}$	
	Вс	$2{,}92\cdot10^{-2}$	$\frac{1}{1+e^{(-9{,}02+0{,}34\cdot(t-t_0))}}$	
Возраст горных выработок	все пласты	$3{,}62\cdot10^{-2}$	$\frac{0{,}16\cdot\left(t-t_0\right)^{0.65}}{1+e^{(-5{,}17+0{,}16\cdot(t-t_0))}}$	

деления более достоверно, а следовательно, могут дать более точный прогноз грядущих изменений вплоть до конца 2022 г.

Верификация модели прогноза сейсмической активности

Для проверки работоспособности модели прогноза сейсмичности на руднике СКРУ-2 Верхнекамского месторождения взяты данные за 2019 г. (исследуемая площадь составляет 8,9% от общей площади рудника). Для 2020 г. изучаемая территория мала и составляет всего 3,1% от общей площади. Это связано с тем, что на руднике СКРУ-2 основные запасы руды уже отработаны, и он находится в стадии ликвидации. Также сокращение площади исследований в сравнении с предыдущими периодами связано со снижением числа регистрируемых сейсмических событий, ставшим результатом неизбежного в ходе ликвидации рудника снижения оптимальности сети по отношению к зонам сейсмической активности.

Для построения модельных карт сейсмического энерговыделения брались данные по камерам для всех трех отрабатываемых пластов (КрII, АБ и Вс). Для каждой камеры известны такие параметры как год отработки, год и тип закладки. Так как на одной территории возможна совместная отработка нескольких пластов, а способность сейсмической сети не позволяют привязать очаги к какому-то конкретному горизонту, данные по всем трем пластам объединялись в один полигональный слой. Каждой камере присваивался идентификатор и ряд других атрибутов: минимальный год отработки, минимальный год закладки, количество отработанных пластов. После этого по формуле (1) и зависимостям, полученным в таблице, производился расчет параметра $P(t)$ для 2019 г. Для построения площадного растра каждому полигональному слою камер ставилась в соответствие только одна точка, находящаяся в центре исходного полигона. Далее с помощью функции интерполяции производился расчет растра прогнозной модели параметра *Es*.

На рис. 1, *а* (см. Приложение, с. 66) представлена карта наблюденной сейсмичности за 2019 г., на рис. 1, *в* — карта соответствующего данному году расчетного показателя сейсмичности $P(t)$. Сопоставление карт наблюденной и рассчитанной сейсмичности производилось качественно (визуальное сравнение) и количественно через коэффициент корреляции. Для надлежащего сравнения использовалась не вся площадь шахтного поля, а только та часть, которая обеспечена достаточным количеством фактического материала (число зарегистрированных сейсмических событий в области радиусом 1 км должно превышать 5 шт.) и достоверной и полной информацией о горнотехнических параметрах отработки. Также к зарегистрированному и рассчитанному полям применялся сглаживающий фильтр с радиусом осреднения 750 м (рис. 1, *б* и 1, *г*). Выбор шага сглаживания обоснован в работе [8].

Необходимость фильтрации зарегистрированной сейсмичности обусловлена тем, что поле может включать в себя случайную составляющую (такую, как влияние взрывных работ), а фильтрация рассчитанного поля нужна для снижения влияния возможных ошибок и мелких неточностей в базе горнотехнических данных. Фильтрация проводилась расчетом среднего значения в квадратном скользящем окне. Ретроспективно для данных 2010 — 2015 гг. было установлено, что без фильтрации коэффициент корреляции для рассчитанного и наблюденного полей составляет 0,41, а применение фильтра способствует увеличению коэффициента корреляции

до 0,49. На новых уточненных данных для 2019 г. после фильтрации коэффициент корреляции увеличился с 0,23 до 0,46. Данный эффект хорошо заметен на рис. 1, *б*, *г*, где отмечается совпадение реальных и прогнозных зон с повышенными значениями плотности выделения сейсмической энергии (зона 1 в северо-западной части и зона 2 в юго-восточной части исследуемой территории). Центральная часть данного участка характеризуется низкими значениями прогностического параметра. Данная территория полностью отработана в основном на двух продуктивных пластах, в настоящее время здесь не ведется отработка сырья.

Таким образом, данный расчет показывает, что прогностическая многофакторная модель позволяет выделить территорию с возможными негативными проявлениями на отработанных участках калийных рудников. С помощью нее можно выделить потенциально опасные участки в пределах шахтного поля.

Прогноз сейсмической активности на 2022 г.

В конце 2021 г. согласно формуле (1) построена прогнозная карта плотности сейсмической энергии, выделение которой ожидается в 2022 г. На рис. 2 (см. Приложение, с. 66) показаны рассчитанные карты модельного параметра $P(t)$ без сглаживания и со сглаживанием значений поля в радиусе 750 м. Необходимо отметить, что карта прогнозной модели рассчитана для всего шахтного поля СКРУ-2. Это связано с тем, что условия и методы отработки калийного сырья на всем руднике остаются практически одинаковыми, что позволяет экстраполировать полученные на предыдущем шаге данные на всю площадь рудника. На полученных картах можно выделить территорию с наибольшим значением прогнозируемого параметра, которая находится в центральной части шахтного поля. Рассматривая эту территорию совместно с планами горных работ, можно сказать, что камеры, на которых ожидается повышенные значения *Es*, имеют возраст 15 — 30 лет. Это соответствует характеру зависимостей, показанных в таблице. 24% этих камер не заложены на всех трех отрабатываемых пластах, 61% заложен хотя бы на одном из пластов и 15% площади заложено на всех отрабатываемых пластах.

Если рассматривать пониженные значения прогностического параметра ($Es < 1$ Дж/100 м^2), то можно отметить, что это составляет примерно 13,5% от всех данных по камерам. Возраст таких горных выработок достигает 35 — 50 лет, что соответствует данным, полученным ранее. Процент камер, в которых была произведена закладка, достигает 98%.

Выводы

Выполненные исследования подтвердили наличие взаимосвязи ряда горно-технических параметров отработки и сейсмической активности в условиях калийного рудника. Выбранная многофакторная математическая модель прогноза сейсмической активности показала адекватное пространственное совпадение рассчитанного поля с фактическим в 2019 г., при количественном уровне коэффициента корреляции 0,46. Такая модель обеспечивает учет влияния выбранного набора значимых факторов на сейсмичность и предоставляет возможность опережающей оценки их интенсивности в подработанном массиве на интервале до двух лет, что соответствует краткосрочному и среднесрочному планированию горных работ. С помощью такой прогностической модели можно выделить на всей площади рудника наиболее опасные участки, где в ближайшее время может произойти активизация процессов разрушения несущих элемен-

тов горных выработок. Также необходимо отметить, что данная модель не описывает аварийные случаи на калийных рудниках.

Опробованная модель объективно отражает существующую реальность, базируясь на выявленных закономерностях, что дает возможность своевременно предусматривать меры безопасности для снижения сейсмической активности на действующих рудниках, и корректировать параметры отработки на стадиях проектирования и строительства новых калийных рудников. Особенностью данной прогностической модели является не прогноз времени и силы сейсмического события, а выделение района, в пределах которого ожидается повышенный уровень сейсмической энергии, причем даже на той территории, где нет возможности установить сейсмические датчики. После выделения таких зон в калийном руднике необходимо проводить мероприятия по снижению интенсивности деформационных процессов в их пределах. При отсутствии такой возможности альтернативой может быть принятие мер по снижению рисков, связанных с вероятными негативными последствиями в пределах выявленных зон.

Полученные в статье результаты могут стать составной частью управления технологическим процессом при дальнейшей разработке Верхнекамского месторождения.

Вклад авторов

Злобина Т.В. — выполнение работ по сбору и систематизации материалов, подготовка и расчет данных, анализ результатов.

Дягилев Р.А. — постановка задачи исследования, руководство, обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шемякин А. С.*, *Федотова Ю. В.* Алгоритм визуализации распределения зон геодинамического риска // Труды Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 10-9. — С. 171–178. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.10.171-178.

2. *Мельников Н. Н.*, *Козырев А. А.*, *Панин В. И.* Техногенная сейсмичность — опасный антропогенный фактор при ведении горных работ в высоконапряженных массивах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2015. — № 5. — С. 425–433.

3. *Герман В. И.* Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 2. — С. 99–109. DOI: 10.1134/S1062739114020124.

4. *Жукова С. А.*, *Самсонов А. В.* Оценка влияния природных факторов на проявление сейсмичности Хибинского массива // Горный журнал. — 2014. — № 10. — С. 47–51.

5. *Журавлев Е. И.* Разработка геоинформационной системы прогнозирования динамических проявлений в углевмещающем массиве при подземной разработке угольных месторождений: дис. … канд. техн. наук. — М.: ИПКО РАН, 2016. — 202 с.

6. *Журавлева О. Г.*, *Аветисян И. М.*, *Земцовский А. В.* Комплексирование сейсмических данных и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива в удароопасных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4. — С. 173–183.

7. *Федотова Ю. В.*, *Жукова С. А.* Влияние природных факторов на проявления техногенной сейсмичности / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. — 2011. — С. 340–343.

8. *Lurka A.* Spatio-temporal hierarchical cluster analysis of mining-induced seismicity in coal mines using Ward's minimum variance method // Journal of Applied Geophysics. 2021, vol. 184. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104249.

9. *Wojtecki, Kurzeja J., Knopik M.* The influence of mining factors on seismic activity during longwall mining of a coal seam // International Journal of Mining Science and Technology. 2021, vol. 31, no. 3, pp. 429–437. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.01.010.

10. *Mu H., Song D., He X., Li Z., Su D., Xue Y.* Regional local integrated rockburst monitoring and early warning for multi-seam mining // Journal of Geophysics and Engineering. 2021, vol. 18, no. 5, pp. 725–739. DOI: 10.1093/jge/gxab048.

11. *Wang X., Wang S., Li Z., Dong Y., Yuen D. A.* Source characterization of some collapse earthquakes due to mining activities in Shandong and Beijing, North China // Seismological Research Letters. 2019, vol. 90, no. 1, pp. 183–193. DOI: 10.1785/0220180184.

12. *Злобина Т. В., Дягилев Р. А.* Применение модели влияния горнотехнических параметров отработки при прогнозе сейсмической активности в калийных рудниках // Геофизика. — 2018. — № 5. — С. 12–17.

13. *Злобина Т. В., Дягилев Р. А.* Совершенствование модели влияния техногенных факторов для прогноза сейсмической активности на руднике СКРУ-2 // Геофизика. — 2019. — № 5. — С. 37–42.

14. *Злобина Т. В.* Влияние ширины и высоты выработки на проявления микросейсмической активности в калийных рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 136–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-136-145. ГИАБ

REFERENCES

1. Shemyakin A. S., Fedotova Yu. V. Algorithm for visualization of the distribution of geodynamic risk zones. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2018, no. 10-9, pp. 171–178. [In Russ]. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.10.171-178.

2. Melnikov N. N., Kozyrev A. A., Panin V. I. Mining-induced seismicity as a hazardous anthropogenic factor at mining in highly stress rock masses. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2015, no. 5, pp. 425–433. [In Russ].

3. German V. I. Rock failure prediction in mines by seismic monitoring data. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no. 2, pp. 99–109. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739114020124.

4. Zhukova S. A, Samsonov A. V. Assessment of natural impact on the seismicity in Khibiny Mountains. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 10, pp. 47–51. [In Russ].

5. Zhuravlev E. I. *Razrabotka geoinformatsionnoy sistemy prognozirovaniya dinamicheskikh proyavleniy v uglevmeshchayushchem massive pri podzemnoy razrabotke ugol'nykh mestorozhdeniy* [Development of the geographic information system for prediction dynamic events in underground coal mine], Candidate's thesis, Moscow, IPKO RAN, 2016, 202 p.

6. Zhuravleva O. G., Avetisyan I. M., Zemtsovskiy A. V. Complexing of seismic data and numerical modeling results on stress state of rocks under rockburst hazard. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 4, pp. 173–183. [In Russ].

7. Fedotova Yu. V., Zhukova S. A. Influence of natural factors on manifestations of mining induced seismicity. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh: Materialy Shestoy Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Materials of the Sixth International Seismological School], 2011, pp. 340–343. [In Russ].

8. Lurka A. Spatio-temporal hierarchical cluster analysis of mining-induced seismicity in coal mines using Ward's minimum variance method. *Journal of Applied Geophysics*. 2021, vol. 184. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104249.

9. Wojtecki, Kurzeja J., Knopik M. The influence of mining factors on seismic activity during longwall mining of a coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, vol. 31, no. 3, pp. 429–437. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.01.010.

10. Mu H., Song D., He X., Li Z., Su D., Xue Y. Regional local integrated rockburst monitoring and early warning for multi-seam mining. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2021, vol. 18, no. 5, pp. 725–739. DOI: 10.1093/jge/gxab048.

11. Wang X., Wang S., Li Z., Dong Y., Yuen D. A. Source characterization of some collapse earthquakes due to mining activities in Shandong and Beijing, North China. *Seismological Research Letters*. 2019, vol. 90, no. 1, pp. 183–193. DOI: 10.1785/0220180184.

12. Zlobina T. V., Dyagilev R. A. Application of the model describing the influence of mining parameters for prediction of seismic activity in potash mines. *Geofizika*. 2018, no. 5, pp. 12–17. [In Russ].

13. Zlobina T. V., Dyagilev R. A. Improvement of the model describing influence of induced factors for prediction seismic activity in Solikamsk-2 mine. *Geofizika*. 2019, no. 5, pp. 37–42. [In Russ].

14. Zlobina T. V. Influence of width and height of rooms on microseismic activity in potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 136–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-136-145.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Злобина Татьяна Викторовна — инженер,
Горный институт Уральского отделения РАН,
e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-2626-6355,
Дягилев Руслан Андреевич — заместитель директора
по научной работе, e-mail: dra@gsras.ru,
Федеральный исследовательский центр
«Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН),
ORCID ID: 0000-0001-5974-5611.
Для контактов: Злобина Т.В.,
e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

T.V. Zlobina, Engineer,
Mining Institute of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia,
e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-2626-6355,
R.A. Dyagilev, Deputy Director on Scientific Work,
Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences,
249035, Obninsk, Russia, e-mail: dra@gsras.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5974-5611.
Corresponding author: T.V. Zlobina,
e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com.

Получена редакцией 29.12.2021; получена после рецензии 11.02.2022; принята к печати 10.03.2022.
Received by the editors 29.12.2021; received after the review 11.02.2022; accepted for printing 10.03.2022.

Рис. 1. Карты плотности выделения сейсмической энергии для СКРУ-2 на 2019 г.: фактическая карта Es (а); отфильтрованная фактическая карта Es с радиусом сглаживания 750 м (б); модельная карта Es (в); отфильтрованная модельная карта Es с радиусом сглаживания 750 м (г). 1, 2 — зоны с повышенной плотностью выделения сейсмической энергии

Fig. 1. Seismic energy release density map for Solikamsk 2 mine in 2019: actual map of Es (a); filtered actual map of Es with smoothing radius of 750 m (b); model map of Es (v); filtered model map of Es with smoothing radius of 750 m (g). 1, 2 — zones of increased density of seismic energy release

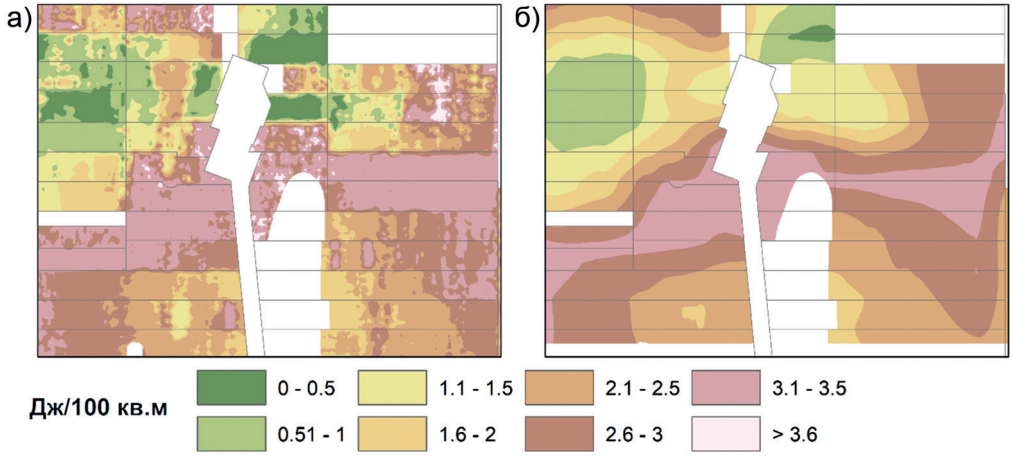


Рис. 2. Карты плотности выделения сейсмической энергии для СКРУ-2 на 2022 г.: модельная карта Es (а); модельная отфильтрованная карта Es с радиусом сглаживания 750 м (б)

Fig. 2. Seismic energy release density map for Solikamsk 2 mine in 2022: model map of Es (a); filtered model map of Es with smoothing map of 750 m (b)