



# Алгоритм прогноза плотности выделения сейсмической энергии для рудника СКРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей

Т.В. Злобина✉, Д.Ю. Шулаков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

✉ [tati.verkholantseva@gmail.com](mailto:tati.verkholantseva@gmail.com)

**Резюме:** Вопрос прогнозирования сейсмической активности на рудниках и шахтах является актуальным для многих горнопромышленных районов мира. Проявление сейсмичности на месторождениях полезных ископаемых является результатом сочетаний определенных геологических и горнотехнических факторов. В данной статье рассматриваются особенности микросейсмической активности на Первом Соликамском калийном рудоуправлении (СКРУ-1) Верхнекамского месторождения калийных солей (г. Соликамск, Пермский край, Россия). Собранный материал, полученный более чем за 25-летний период мониторинговых наблюдений, послужил базой для выявления пространственно-временных закономерностей, которые вошли в основу методологии прогноза сейсмичности на руднике. В статье описаны этапы прогнозирования такого параметра сейсмичности, как плотность выделения сейсмической энергии –  $E_s$ . Разработанная методика позволяет проводить верификацию и апробацию заданной модели. Применение корреляционного и регрессионного анализа выявило, что предложенный алгоритм дает возможность предсказывать максимальный уровень сейсмичности на всей территории рудника на основании горнотехнических параметров. Результатом выполнения данного алгоритма является прогнозная карта на 2023 г. для изучаемого рудника. На полученной карте выделены области с параметром  $E_s$  более 20 Дж/100 м<sup>2</sup>, которые являются геодинамически опасными зонами, на которых необходимо проводить соответствующие мероприятия для снижения интенсивности деформационных процессов.

**Ключевые слова:** калийный рудник, сейсмологический мониторинг, техногенная сейсмичность, модель прогноза, горнотехнические параметры обработки, пространственный анализ, прогнозирование, корреляционный анализ, регрессионный анализ

**Благодарности:** 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. (рег. номер 122012000401-7)

**Для цитирования:** Злобина Т.В., Шулаков Д.Ю. Алгоритм прогноза плотности выделения сейсмической энергии для рудника СКРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей. *Горная промышленность*. 2023;(S1):76–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-76-82>

## Method for prediction of the density of released seismic energy for Solikamsk-1 mine at the Upper Kama potash deposit

T.V. Zlobina✉, D.Yu. Shulakov

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

✉ [tati.verkholantseva@gmail.com](mailto:tati.verkholantseva@gmail.com)

**Abstract:** The issue of predicting seismic activity at mines is relevant for many industrial areas of the world. Seismic events recorded in different deposits are the result of combinations of geological and mining factors. This article describes characteristic of microseismic activity at the Solikamsk-1 mine of the Upper Kama potash salt deposit (Perm Territory, Russia). The collected seismic material, obtained over more than 25 years of monitoring observations, is the foundation for identifying the spatial and temporal characteristics. This information is the basis of the concept for seismic prediction at the mine. The article represents the stages of predicting one of the seismic parameters, i.e. the density of seismic energy release –  $E_s$ . The selected stages allow carrying out verification and approbation of the mathematical model. The correlation and regression analyzes showed that this algorithm makes it possible to predict the maximum level of seismicity throughout the mine, where mining parameters are identical. The result of this methodology is the prediction map for 2023 for the Solikamsk-1 mine. This map shows zones with the value of the  $E_s$  parameter exceeding 20 J/100 m<sup>2</sup>, which are the most geodynamically hazardous areas. Appropriate measures to reduce the intensity of the deformation processes need to be implemented in these zones.

**Keywords:** potash mine, seismic monitoring, induced seismicity, prediction model, mining parameters, spatial analysis, prediction, correlation analysis, regression analysis

**Acknowledgements:** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2021-374 on December 29, 2020, reg. No. 122012000401-7)

**For citation:** Zlobina T.V., Shulakov D.Yu. Method for prediction of the density of released seismic energy for Solikamsk-1 mine at the Upper Kama potash deposit. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):76–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-76-82>



## Введение

В шахтной сейсмологии разработано довольно много методов прогноза реализации сейсмических событий в подработанном массиве горных пород. В настоящее время не существует единого универсального метода прогноза микросейсмической активности на рудниках. Существующие методы в большинстве случаев основаны на определенных конкретных задачах промышленного предприятия. Чаще всего прогнозирование базируется на имеющихся каталогах землетрясений и предположении, что наблюдаемые в прошлом характеристики сейсмичности могут быть экстраполированы в будущее. Также используются статистические методы анализа таких каталогов и изучения взаимосвязи сейсмичности с различными влияющими на ее уровень факторами. В связи с тем что сейсмичность в рудниках главным образом вызвана самими горными работами, зарегистрированные сейсмические события могут использоваться для прогноза сейсмичности в течение сравнительно небольшого интервала времени в будущем, за которое горно-геологическая обстановка может считаться схожей с обстановкой, имевшей место в прошлом [1]. Вопросу возможности прогноза сейсмической активности на рудниках посвящены многие научные статьи [2; 3]. Некоторые методы основаны на качественном анализе сейсмических параметров, другие используют различные количественные характеристики сейсмичности [4–7]. Также существует разногласие в предмете прогнозирования. Некоторые статьи освещают вопрос перспективы определения точного местоположения, времени и магнитуды будущих событий, но, к сожалению, эта задача является трудно выполнимой. Поэтому многие специалисты утверждают, что предупреждение геодинамической опасности должно базироваться на выявлении границ опасных участков геологической среды [8].

В данной работе освещается вопрос возможности прогноза уровня микросейсмической активности для условий рудника СКРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей, а именно выделения геодинамически опасных зон, основанного на каталоге ранее зарегистрированных сейсмических событий с учетом фактора времени.

## Особенности микросейсмической активности на руднике СКРУ-1

Шахтное поле рудника СКРУ-1 территориально расположено на северном крыле Соликамского участка Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), простирается на 6,5 км в меридиональном направлении и на 6,2 км в широтном. Промышленными пластами на шахтном поле являются пласты АБ, Вк, Вс, КрII. [9] В настоящее время рудник СКРУ-1 является единственным на ВКМКС, добывающим карналлит (пласт Вк).

Рассматривая геологическое строение месторождения, можно отметить, что шахтное поле рудника расположено в сводовой части Соликамской брахиантиклинали. Тектонические структуры соляной залежи значительно сложнее структур подсолевого и надсолевого комплекса, это связано с внутрисоляными деформациями, которые выражены в складчатом строении. Для солей ВКМКС характерны: резкая дисгармоничность, асимметрия, разномаштабность и неравномерность распространения. Соляные пласты под влиянием тектонических проявлений собраны в мелкие складки, которые вытянуты в субмеридиональном направлении. Особенно сильная складчатость наблюдается в пределах пластов АБ и В. Разрывные нарушения

в соляных породах развиты слабо. Более крупные разрывные нарушения характерны для пластов карналлитовой зоны [9].

Промышленная отработка данного участка началась в 1936 г. и продолжается по настоящее время. Особенности вскрытия пластов, способа подготовки и раскройки шахтного поля представлены в работах [10; 11]. Необходимо отметить, что основная сложность разработки Верхнекамского месторождения калийных солей заключается в легкой растворимости солей и обводненности вышележащей над соляным массивом толщи пород, опасности проникновения подземных вод в горные выработки. Вследствие сложных горно-геологических, горнотехнических условий и отсутствия надежного водоупора над соляной толщей отработка запасов калийных солей осуществляется с жестким поддержанием вышележащих пород на предохранительных целиках [12].

Первые сейсмологические наблюдения на данном шахтном поле были получены в 1995 г. В самом руднике установлено 7 сейсмопавильонов. Пространственное распределение их неравномерно и зависит как от горнотехнической обстановки, так и от физической возможности установить регистрирующее оборудование. Сейсмопавильоны оснащены вертикальными сейсмоприемниками СМЗ-КВ, позволяющими регистрировать сейсмические сигналы в диапазоне частот от 0,5 до 100 Гц. Посредством кабельных телеметрических линий связи сейсмоприемники связаны с наземными регистрирующими модулями, которые в непрерывном режиме принимают сигналы сейсмоприемников и фиксируют сейсмические события [13]. Летом 2022 г. дополнительно были установлены 9 сейсмопавильонов на земной поверхности над горными выработками. Каждый из них оборудован 3-компонетным сейсмометром с собственной частотой 2 Гц, установленным в 10-метровой скважине, и автономным регистрирующим модулем. Подробное описание структуры мониторинговой сети, ведущей режимные наблюдения на руднике, и ее регистрационные возможности представлены в работе [14].

За период с 2000 по ноябрь 2022 г. на руднике СКРУ-1 зарегистрировано более 3000 сейсмических событий, связанных с деформационными процессами в подработанном массиве горных пород. Суммарная энергия сейсмических событий, произошедших на территории рудника, составила 4 МДж. Особенностью зарегистрированных событий является то, что они не связаны с текущими горными работами, а реализуются через некоторое время после отработки. Это связано с тем, что сильвинит обладает выраженными реологическими свойствами, а само Верхнекамское месторождение не является удароопасным [15].

## Алгоритм прогноза сейсмической активности

Алгоритм изучения пространственно-временных закономерностей проявления микросейсмической активности на рудниках Верхнекамского месторождения, а также этапы прогнозирования ее уровня приведены на рис. 1. Для реализации данного алгоритма был создан проект на базе программного пакета ArcGIS, использовались модули пространственного анализа (*Spatial Analysis Tools*) и пространственной статистики (*Spatial Statistics Tools*). Проект содержит в себе сейсмологическую информацию (эпицентры сейсмических событий, их энергию, расположение датчиков), а также различную горнотехническую информацию (данные по отработке, закладке камер, геометрические параметры).



**Первый этап** данного алгоритма заключается в выделении факторов, влияющих на уровень микросейсмической активности. Их можно разделить на две большие группы: природные и техногенные. Среди природных составляющих микросейсмичности можно выделить: физико-механические свойства горных пород, тектоническое строение территории, структурные особенности вмещающих пород, напряженно-деформированное состояние массива, гидрогеологические условия, строение и мощность водозащитной толщи, удаленные тектонические землетрясения. В числе техногенных необходимо отметить влияние самих горных выработок, а также их возраст, наличие, тип и возраст закладочного материала, взрывные работы и их геометрические параметры. Проявление сейсмической активности имеет интегральную природу, т.е. является результатом взаимодействия нескольких действующих факторов.

**Второй этап** алгоритма прогноза сводится к выбору прогнозируемого сейсмического параметра. Необходимо отметить, что приведенный алгоритм на рис. 1 будет заключаться не в выявлении времени и места следующего крупного сейсмического события на руднике, а в выделении зоны с повышенными значениями такого параметра, как плотность выделения сейсмической энергии –  $E_s$  (отношение суммарной выделившейся сейсмической энергии на каком-либо участке к площади этого участка). Выбор данной величины можно аргументировать тем, что, с одной стороны, данный параметр дает достаточно полное представление о характеристиках сейсмических процессов, а с другой, позволяет в значительной степени обобщить информацию о микросейсмической активности на изучаемой территории за определенный интервал времени. В представленной методике параметр  $E_s$  рассчитывался за интервал времени один год.

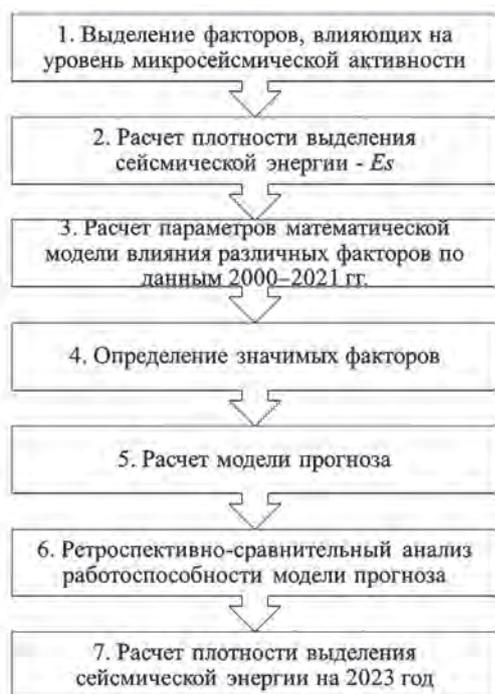


Рис. 1  
Алгоритм прогнозирования плотности выделения сейсмической энергии на руднике СКРУ-1

Fig. 1  
Algorithm for prediction of the density of released seismic energy for Solikamsk-1 mine

**Третий этап** подробно описан в работе [16]. Согласно данной статье наблюдаемая сейсмичность на руднике не связана с текущими горными работами, а регистрируется на уже отработанной территории. Максимум энерговыделения приходится на выработки с возрастом 20–25 лет для сальвинитовых пластов, и 60 лет – для карналлита. При этом средний уровень плотности выделения сейсмической энергии на сальвинитовых пластах выше практически в два раза, чем на карналлитовых. Изучение влияния типа закладочного материала показало, что гидравлическая закладка дает более быстрое затухание сейсмичности, чем сухая закладка. Изучение других факторов (физико-механические свойства, взрывные работы, удаленные землетрясения и т.д.) представлено в работе [17].

Далее (**четвертый этап**) необходимо выбрать те факторы, которые целесообразно использовать при прогнозе. В этом случае, если рассматривать сейсмическую активность как временной ряд, можно выделить в ней общую тенденцию (тренд), а также периодические колебания и случайные отклонения. Так, главными задачами при прогнозе сейсмичности являются выбор трендовой компоненты сейсмического ряда и учет влияния других сезонных/случайных компонент. В случае калийных солей основным (трендовым) фактором является возраст отработанных камер, в качестве периодических изменений было выбрано влияние возраста и типа закладочного материала уже отработанных камер.

Для расчета модели прогноза была предложена следующая формула (**пятый этап**):

$$P(t) = P_0 \sum_{i=0}^n \frac{U_i(t, t_i)}{n} \quad (1)$$

где  $P(t)$  – прогнозируемое значение плотности выделения сейсмической энергии, рассчитанное для определенного года (Дж/100 м<sup>3</sup>);  $P_0$  – максимальный уровень сейсмичности, а именно плотности выделения сейсмической энергии для фактора возраста горных выработок (Дж/100 м<sup>3</sup>);  $U_i(t, t_i)$  – функция, описывающая относительные изменения влияния выбранных факторов с течением времени;  $t$  – момент времени, для которого рассчитывается модельное значение;  $t_i$  – момент начала действия фактора.

Данный параметр рассчитывался для каждой отдельной камеры на основании характеристик, полученных из базы данных по параметрам отработки.

**Шестой этап** прогнозирования – это ретроспективно-сравнительный анализ работоспособности модели. Данный этап необходим для установления, насколько модельные представления адекватно отражают сами исходные данные, послужившие для ее параметризации. Для шестого этапа были взяты расчетные и зарегистрированные параметры сейсмичности для пяти лет (2017–2021 гг.), для его реализации использовались корреляционный и регрессионный анализы.

В качестве исходных данных на данном этапе были взяты полигональные слои отработанных камер по четырем продуктивным пластам рудника СКРУ-1. Все эти слои объединялись в один, при этом каждый полигон-камера наделялся соответствующей атрибутивной информацией: идентификатор (*id*-номер), площадь, количество пластов, минимальный год отработки, минимальный год закладки. По этим данным уже проводился расчет прогнозного параметра по формуле (1). Для сопоставления площадных данных были построены растры модельных значений  $E_s$  методом интерполяции кригинг.



Таблица 1  
Коэффициенты корреляции и детерминации

Table 1  
Correlation and determination coefficients

Год	Площадь выбранных камер, км <sup>2</sup> (доля от общей площади, %)	Коэффициент корреляции	Коэффициент корреляции (сглаженные данные)	Коэффициент детерминации	Коэффициент детерминации (логарифмированные данные)
2017	2,87 (24,72 %)	0,33	0,40	0,10	0,12
2018	3,73 (32,13 %)	0,21	0,25	0,03	0,07
2019	1,98 (17,05 %)	0,19	0,26	0,04	0,10
2020	2,22(19,12 %)	0,32	0,39	0,13	0,18
2021	1,49 (12,84 %)	0,16	0,20	0,01	0,02

Для каждого года – с 2017 по 2021 – проводилось сравнение фактических и модельных карт как визуальным методом, так и с помощью расчета коэффициента корреляции Пирсона (сопоставление данных проводилось для каждой отдельной ячейки раstra). При этом для сравнения бралась не вся площадь, а только ее часть, для которой имелся достаточный объем горнотехнических данных и при этом наблюдался значимый уровень сейсмической активности (не менее пяти событий в окружности с радиусом 1500 м). В табл. 1 представлены информация о взятых площадях для анализа, а также соответствующие коэффициенты корреляции, которые достигли значений 0,1–0,3. В связи с небольшими значениями данного параметра полученные растры сглаживались путем нахождения среднего значения в некоторой заданной области. Оптимальный радиус сглаживания составил 375 м. Сглаженные растры показали лучшую корреляцию между рассчитанной и зарегистрированной сейсмичностью, коэффициент составил 0,2–0,4. Для описания степени корреляции используется шкала классификации тесноты связи Чеддока. Согласно полученным данным (табл. 1) тип связи можно охарактеризовать как слабый и умеренный.

В качестве наглядного подтверждения совпадения зон можно привести карты зарегистрированной (рис. 2, а) и рассчитанной (рис. 2, б) плотности выделения сейсмической энергии на 2020 г. Визуально можно отметить повышенные значения  $E_s$  в юго-западной и юго-восточной частях выбранной территории. Сглаженные карты зарегистрированного и рассчитанного значения  $E_s$  представлены на рис. 2, в и 2, г соответственно.

Для реализации регрессионного анализа атрибутивных данных были найдены фактические значения плотности выделения сейсмической энергии для каждой камеры путем нахождения среднего значения ячеек раstra, попадающих на эту площадь. На рис. 3, а представлен график зависимости зарегистрированной сейсмичности от модельных значений. Рассматривая его, необходимо выделить определенную тенденцию: с увеличением прогностического параметра увеличивается максимальное фактическое значение зарегистрированной сейсмичности. Таким образом, представленные данные позволяют говорить о возможности уверенного прогноза максимального уровня сейсмичности на конкретном участке шахтного поля исходя из горнотехнических параметров его отработки.

При применении метода наименьших квадратов (МНК) регрессионного анализа между фактическими и модель-

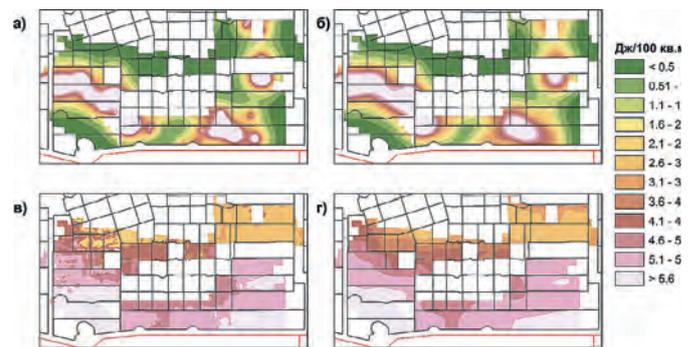
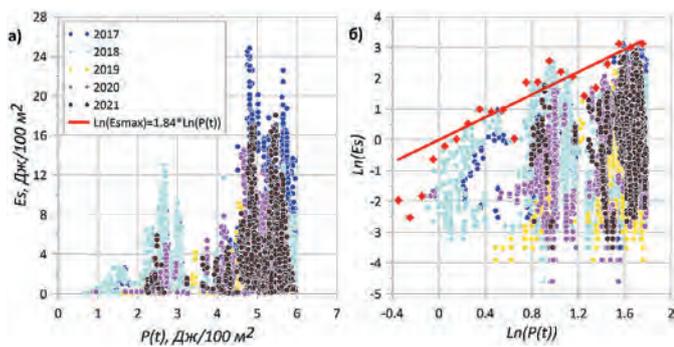


Рис. 2  
Карты плотности выделения сейсмической энергии для СКРУ-1 на 2020 год:  
а – фактическая карта  $E_s$ ;  
б – отфильтрованная фактическая карта  $E_s$  с радиусом сглаживания 375 м;  
в – модельная карта  $E_s$ ;  
г – отфильтрованная модельная карта  $E_s$  с радиусом сглаживания 375 м

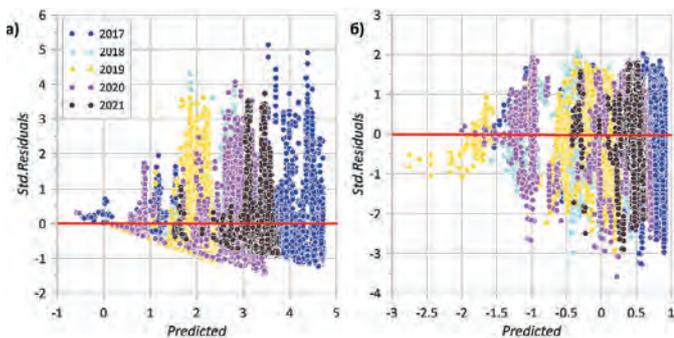
Fig. 2  
Seismic energy release density maps in Solikamsk-1 mine for 2020 year:  
a – actual map of  $E_s$ ;  
b – filtered actual map of  $E_s$  with a smoothing radius of 375 m;  
c – model map of  $E_s$ ;  
d – filtered  $E_s$  model map with a smoothing radius of 375 m

ными параметрами сейсмичности были получены значений невязок и коэффициенты детерминации (см. табл. 1). Значения данного параметра варьируются от 0,01 до 0,13. Рис. 4, а демонстрирует графики невязок регрессии, которые показывают распределение пере- и недооценок по отношению к прогнозированным значениям. В идеальном случае данные значения должны распределяться случайно. Как видно из рис. 4, а, значения распределены неравномерно, есть смещения в положительные значения (положительная асимметрия). Это говорит о наличии нелинейной связи между параметрами, для устранения этого смещения данные были прологарифмированы. Зависимость логарифма зарегистрированных значений  $E_s$  от логарифма рассчитанных показана на рис. 3, б. Рис. 4, б демонстрирует зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений для логарифмированных данных. Необходимо заметить, что такого смещения, как было ранее, не наблюдается, что говорит об адекватности регрессионной модели. Коэффициенты детерминации для логарифмированных данных отображены в табл. 2 ( $R^2$  составил 0,02–0,18). Как видно из рис. 4, б, одному и тому же значению модельного параметра могут соответствовать



**Рис. 3**  
а – Зависимость зарегистрированной плотности выделения сейсмической энергии от рассчитанного значения;  
б – зависимость логарифма зарегистрированной плотности выделения сейсмической энергии от логарифма рассчитанного значения

**Fig. 3**  
а – dependence of the registered seismic energy release density on the calculated value;  
б – dependence of the logarithm of the registered seismic energy release density on the logarithm of the calculated value



**Рис. 4**  
а – зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений;  
б – зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений для логарифмированных данных

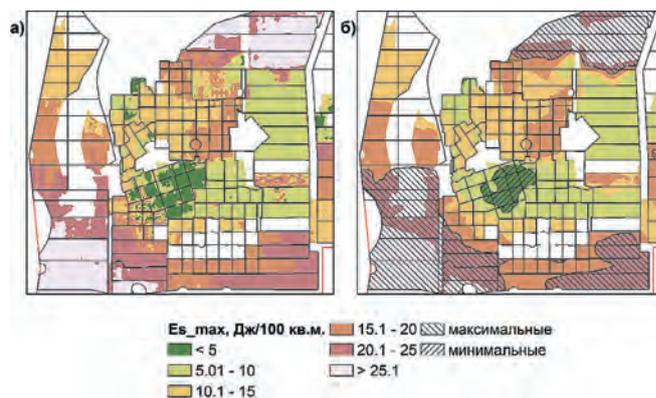
**Fig. 4**  
а – dependence of standard residuals on predicted values;  
б – dependence of standard residuals on predicted values for logarithm data

различные значения фактического, т.е. достаточно уверенно можно спрогнозировать только максимальный уровень сейсмической активности при определенных сочетаниях горнотехнических параметров. Формула максимально возможной плотности выделения сейсмической энергии, исходя из определенных горнотехнических параметров отработки, имеет вид:

$$\ln(Es_{max}) = 1,84 \cdot \ln(P(t)) \quad (2)$$

где  $P(t)$  – рассчитанное значение плотности выделения сейсмической энергии для каждой камеры,  $Es_{max}$  – максимально возможное значение плотности выделения сейсмической энергии.

Последним завершающим седьмым этапом алгоритма прогноза является расчет прогностического сейсмического параметра – ожидаемого максимального уровня плотности выделения сейсмической энергии. Прогноз уровня сейсмической активности на рудниках может быть оценен для разных интервалов времени в будущем. Согласно



**Рис. 5**  
Карты максимальных значений плотности выделения сейсмической энергии для СКРУ-1 на 2023 год:  
а – модельная карта  $Es_{max}$ ;  
б – модельная отфильтрованная карта  $Es_{max}$  с радиусом сглаживания 375 м

**Fig. 5**  
Seismic energy release density maps in Solikamsk-1 mine for 2023:  
а – model map of  $Es_{max}$ ;  
б – модельная отфильтрованная карта  $Es_{max}$  with a smoothing radius of 375 m

работе [1] прогноз бывает: краткосрочным (период менее одного месяца), среднесрочным (интервал до одного года) и долгосрочным (период от нескольких лет до окончания разработки рудника). Представленный в работе алгоритм расчета плотности выделения сейсмической энергии реализует прогноз для временного периода в интервале один год, что является среднесрочным. На рис. 5 изображены карты максимальных значений плотности выделения сейсмической энергии для рудника СКРУ-1 на 2023 г. (рис. 5, а – модельная карта  $Es_{max}$ , рис. 5, б – модельная карта  $Es_{max}$  с радиусом сглаживания 375 м). В отличие от предыдущего этапа данные карты строились для всего шахтного поля, т.е. проводилась экстраполяция полученных на предыдущем шаге результатов на всю площадь рудника.

Рассматривая рис. 5, можно выделить зоны с пониженными значениями ( $Es_{max} < 5$  Дж/100 м<sup>2</sup>) и повышенными значениями ( $Es_{max} > 20$  Дж/100 м<sup>2</sup>). Территория с низкими значениями прогностического параметра находится в центральной части шахтного поля. Это всего лишь 2% от всех данных по отработанному камерам, при этом возраст их достигает 60 лет и более, т.е. это наиболее «старые» выработки на этом руднике, где процесс деформирования горных пород уже практически полностью завершился. В отличие от этой территории северо-восточная часть шахтного поля, а также юго-западная и юго-восточная части характеризуются наиболее высокими значениями максимально возможной плотности выделения сейсмической энергии. Они составляют примерно треть всей площади рудника. Анализ этой территории показал, что расположенные здесь камеры имеют возраст 10–40 лет, для 17% из них не выполнены закладочные работы. Выделенная территория, вероятно, связана с деформационными процессами в горных выработках, т.е. является опасной по возможным динамическим проявлениям в будущем году.

### Заключение

Микросейсмическая активность, вызванная горными работами, является реакцией породного массива на непрерывную добычу полезных ископаемых. Представ-



ленный в статье алгоритм прогноза максимально возможного уровня сейсмической активности (плотности выделения сейсмической энергии) позволяет изучить пространственно-временные закономерности сейсмичности на той территории, где обеспечена достаточная представительность данных сейсмомониторинга (как по энергии, так и по времени наблюдения). Полученная зависимость дает возможность предсказывать уровень сейсмичности на любом участке шахтного поля вне зависимости от регистрационных возможностей сейсмической сети. Вместе с тем данный метод позволяет учитывать не один фактор, влияющий на уровень микросейсмичности, а несколько,

что позволяет наиболее точно выделять зоны повышенной сейсмической активности.

Корреляционный и регрессионный анализ показал, что прогноз сейсмичности можно осуществлять, используя две основные горнотехнические характеристики отработки (возраст горных выработок и особенности закладки). Использование методов пространственного анализа и пространственной статистики обеспечило объективное выделение геодинамически активных зон, в пределах которых необходимо проводить профилактические мероприятия по снижению интенсивности деформационных процессов.

### Список литературы

1. Маловичко Д.А. Оценка сейсмической опасности в рудниках. *Российский сейсмологический журнал*. 2020;2(2):21–38. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>
2. Zhu S., Liu J., Jiang F., Shang X., Sun X., Zhang X., Song D., Zhang M., Wang A., Xie H., Qu X. Classification, prediction, prevention and control of roof movement-type mine earthquakes and induced disasters in China's coal mines. Meitan Xuebao. *Journal of the China Coal Society*. 2022;47(2):807–816. (In Chinese) <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.XR21.1800>
3. Agrawal A., Choudhary B.S., Murthy V.M.S.R. Seismic energy prediction to optimize rock fragmentation: a modified approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19(11):11301–11322. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03753-w>
4. Wang S., Si G., Wang C., Cai W., Li B., Oh J., Canbulat Is. Quantitative assessment of the spatio-temporal correlations of seismic events induced by longwall coal mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(5):1406–1420. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.04.002>
5. Glazer S.N. Mine seismology: Seismic response to the caving process: A case study from four mines. Springer Nature; 2018. 242 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95573-5>
6. Nazarevych L.Ye., Nazarevych A.V., Nishchimenko I.M., Oliynyk H.I. The failed technogenic earthquake of September 30 (29), 2017, in Stebnyk and the natural seimotectonic activity of the area. In: *17<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801821>
7. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(7):5–17. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_7\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5)
8. Козырев А.А., Федотова Ю.В., Журавлева О.Г. Вероятностный прогноз сейсмоопасных зон в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2014;17(2):225–230.
9. Белкин В.В. *Мониторинг геологической среды Верхнекамского соленосного бассейна*. 2-е изд. Березники: Березниковский филиал Перм. гос. техн. ун-та; 2006. 252 с.
10. Кутовой С.Н., Катаев А.В., Ефимов Е.М., Оверин А.В. Автоматизация производственных процессов при создании годовых планов развития горных работ. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2019;19(3):240–250. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.3.4>
11. Соловьев В.А., Секунцов А.И. *Разработка калийных месторождений*. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та; 2013. 265 с.
12. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования. *Горная промышленность*. 2022;(1):41–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>
13. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей. *Горный журнал*. 2008;(10):25–29.
14. Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г., Верхоланцев А.В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения. *Горный журнал*. 2018;(6):25–29. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.05>
15. Асанов В.А., Паньков И.Л., Гурко И.В. Хрупкое разрушение соляных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005;(7):137–142.
16. Злобина Т.В. Обновление параметров модели прогноза сейсмической активности для рудника СКРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей. *Горное эхо*. 2022;(1):101–108. <https://doi.org/10.7242/echo.2022.1.16>
17. Дягилев Р.А., Злобина Т.В., Шулаков Д.Ю. Техногенная сейсмичность в калийных рудниках Верхнекамского месторождения. В кн.: Мельников Н.Н. (ред.) *Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2018. Т. 1. С. 80–94.

### References

1. Malovichko D.A. Assessment of seismic hazard in mines. *Russian Journal of Seismology*. 2020;2(2):21–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>
2. Zhu S., Liu J., Jiang F., Shang X., Sun X., Zhang X., Song D., Zhang M., Wang A., Xie H., Qu X. Classification, prediction, prevention and



- control of roof movement-type mine earthquakes and induced disasters in China's coal mines. Meitan Xuebao. *Journal of the China Coal Society*. 2022;47(2):807–816. (In Chinese) <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.XR21.1800>
3. Agrawal A., Choudhary B.S., Murthy V.M.S.R. Seismic energy prediction to optimize rock fragmentation: a modified approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19(11):11301–11322. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03753-w>
4. Wang S., Si G., Wang C., Cai W., Li B., Oh J., Canbulat Is. Quantitative assessment of the spatio-temporal correlations of seismic events induced by longwall coal mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(5):1406–1420. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.04.002>
5. Glazer S.N. Mine seismology: Seismic response to the caving process: A case study from four mines. Springer Nature; 2018. 242 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95573-5>
6. Nazarevych L.Ye., Nazarevych A.V., Nishchimenko I.M., Oliynyk H.I. The failed technogenic earthquake of September 30 (29), 2017, in Stebnyk and the natural seimotectonic activity of the area. In: *17<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801821>
7. Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny massif. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(7):5–17. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_7\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5)
8. Kozyrev A.A., Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G. Probabilistic prediction of seismic hazardous zones in rockburst-prone ore mines of the Khibiny massif. *Vestnik of MSTU*. 2014;17(2):225–230. (In Russ.)
9. Belkin V.V. Monitoring of the geological environment of the Upper Kama salt-bearing basin. 2<sup>nd</sup> ed. Berezniki: Berezniki Branch of Perm State Technical University; 2006. 252 p. (In Russ.)
10. Kutovoi S.N., Kataev A.V., Efimov E.M., Overin A.V. Workflow automation for mining operations annual plans. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2019;19(3):240–250. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.3.4>
11. Soloviev V.A., Sekuntsov A.I. *Exploitation potash deposit*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2023, 265 p. (In Russ.)
12. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):41–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>
13. Malovichko A.A., Malovichko D.A., Dyagilev R.A. Seismological observation in mines at the Upper Kama potash deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2008;(10):25–29. (In Russ.)
14. Shulakov D.Yu., Butyrin P.G., Verkholantsev A.V. Seismological monitoring at the Upper Kama Potash Deposit: Objectives, problems, solutions. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(6):25–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.05>
15. Asanov V.A., Pankov I.L., Gurko I.V. Brittle fracture of salt rocks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2005;(7):137–142. (In Russ.)
16. Zlobina T.V. Parameter improvement of the seismic activity prediction model for Solikamsk-1 mine at Upper Kama potash deposit. *Gornoe ekho*. 2022;(1):101–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2022.1.16>
17. Dyagilev R.A., Zlobina T.V., Shulakov D.Yu. Induced seismicity in potash mines of the Upper Kama deposit. In: Melnikov N.N. (ed.) *Geomechanical field and processes: experimental-and-analytical research into initiation and growth of source zones of disastrous events in geotechnical and natural systems*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018, vol. 1, pp. 80–94. (In Russ.)

#### **Информация об авторах**

**Злобина Татьяна Викторовна** – инженер, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2626-6355>; e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com

**Шулаков Денис Юрьевич** – кандидат технических наук, зав. лаборатории ПТС, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5673-8819>; e-mail: shulakov@mi-perm.ru

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 30.12.2022

Поступила после рецензирования: 23.01.2023

Принята к публикации: 25.01.2023

#### **Information about the authors**

**Tatiana V. Zlobina** – Engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2626-6355>; e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com

**Denis Yu. Shulakov** – Head of Laboratory, Cand. Sci. (Eng.), Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5673-8819>; e-mail: shulakov@mi-perm.ru

#### **Article info**

Received: 30.12.2022

Revised: 23.01.2023

Accepted: 25.01.2023