

**ОБНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ
ПРОГНОЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
ДЛЯ РУДНИКА СКРУ-1
ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

Т.В. Злобина

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье описана многофакторная математическая модель прогноза параметра сейсмичности плотности выделения сейсмической энергии для рудника СКРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей. Представлена методика расчета параметров заданной модели, а также получены новые результаты вычислений с учетом ранее не привлеченных данных по сейсмичности и горнотехническим параметрам (за последние восемь лет). Получены параметры прогностической модели для двух основных факторов: возраст отработанных камер, а также возраст и тип закладочного материала. Фактор «количество отработанных пластов» показал низкую значимость и неустойчивый результат. Новые расчеты показали, что привлечение актуальных данных приводит к совершенствованию и уточнению математической многофакторной модели.

Ключевые слова: калийный рудник, сейсмологический мониторинг, техногенная сейсмичность, математическая модель, горнотехнические параметры отработки, пространственный анализ, прогноз.

Введение

На Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) существуют различные методы изучения и контроля подработанного массива калийных солей. Каждый из методов рассматривает подработанный массив со своей стороны. Одним из основных способов контроля являются топогеодезические инструментальные наблюдения за сдвижением земной поверхности по профильным линиям грунтовых реперов [1]. В работе [5] показана возможность использования спутниковых систем для контроля деформации: описана оценка природной тектонической активности территории, показано влияние различных техногенных составляющих на геодинамику региона, а также отображена возможность оценки последствий техногенных аварий и опасных геодинамических явлений с помощью спутниковых наблюдений. Важная роль при изучении массива отводится геофизическим методам исследования. Результаты данных исследований используются при создании модели горного массива и прослеживании изменения её параметров под влиянием природных и техногенных факторов для выявления потенциально опасных зон, прогноза возникновения и развития негативных процессов. Так, в работах [2, 3] показана возможность применения гравиметрических наблюдений для исследования плотностного строения толщи месторождения, а также для оконтуривания и изучения аварийных зон. Сейсмологический мониторинг занимает особое место, как применяющийся в непрерывном режиме. Задачей сейсмологического мониторинга на ВКМКС является обнаружение и контроль зон возможного разрушения горного массива [8, 10]. Обоснованность применения данного метода при ведении мониторинга геологической среды исходит из понимания причин возникновения негативных геодинамических явлений на калийных рудниках, таких как внезапные просадки земной поверхности, газодинамические явления, техногенные землетрясения. Эти явления вызваны реакцией массива на вывод его из состояния относительного равновесия в результате извлечения больших объемов руды, что вызывает перераспределение энергии в массиве и проявляется в изменении региональной и локальной сейсмичности.

Методика

Сейсмологические наблюдения на руднике СКРУ-1 ведутся более 20 лет. За этот период собран огромный объем информации о сейсмичности данного рудника и о причинах изменчивости сейсмических параметров во времени и пространстве. В работах [4, 6, 7] представлена методика прогноза сейсмичности для рудников ВКМКС, основанная на сейсмологических данных с 2000 по 2014 гг. Для своевременного и более точного прогноза сейсмичности, а именно такого ее параметра, как плотность выделения сейсмической энергии E_S на 2022-2023 гг. для рудника СКРУ-1, необходимо обновить параметры модели прогноза с помощью новых, ранее не привлеченных данных с 2014 по 2021 год. Для этого была взята за основу модель и методика нахождения параметров этой модели, которая описана в работах [4, 6, 7]. Необходимо отметить, что существенным изменением в вычислении параметров стало изменение территории, которая бралась для расчета. Ранее учитывалась общая территория, рассчитанная по данным 2000-2014 гг., в пределах которой было зарегистрировано более 5 сейсмических событий на участке радиусом 400 м, влияние каждого отдельного года на уровень сейсмичности в данном случае не учитывалось. Но, как показали расчеты, эта территория не всегда адекватно отражает сейсмическую активность по отдельным годам. Поэтому для более точного расчета новые границы строились для каждого отдельного года при условии, что выбранные сейсмические события участвовали в построении карт плотности выделения сейсмической активности (по графику повторяемости). Граница проводилась для каждого отдельного года с 2000 по 2021 гг. по участкам, на которых зарегистрировано не менее 5 сейсмических событий в окружности радиусом 1000 м. Сама прогностическая модель имеет следующий вид:

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

В данной формуле прогнозируемый параметр сейсмичности $P(t)$ (а именно, плотность выделения сейсмической энергии E_S) будет равен произведению совокупности влияющих факторов. Параметр P_0 имеет смысл максимального уровня плотности выделения сейсмической энергии, выявленного для различных вариантов сочетаний обрабатываемых продуктивных пластов. Нормированная от 0 до 1 функция $U_i(t, t_{0i})$ описывает относительные изменения во времени i -го фактора. Параметр t является временем, измеряемый в годах. Подробное описание этапов расчета данных параметров приводится в работе [4].

Результаты

Необходимо отметить, что изучить, а тем более внедрить в прогноз все влияющие на сейсмичность факторы невозможно. Ранее были выявлены наиболее весомые горно-технические факторы, которые были включены в ретроспективную проверку прогностической модели [4, 6]. Это возраст горных выработок, различные сочетания обрабатываемых пластов, а также тип складочного материала и их возраст.

Возраст горных выработок

Возраст горных выработок является одним из основных влияющих факторов, это связано с тем, что соляные горные породы обладают реологическими свойствами и не являются хрупкими. В связи с этим сейсмичность проявляется не сразу после отработки, а спустя некоторое время. Так, ранее при изучении влияния возраста горных выработок на руднике СКРУ-1 ВКМКС было выявлено [4], что уровень средней

плотности выделения сейсмической энергии для разных пластов различен, а стадия активного разрушения приходится на разные временные интервалы. Для сочетания пластов АБ+Вс максимальные значения плотности выделения сейсмической энергии достигались при возрасте 28 лет ($P_0 = 7.2$ Дж/100 м²). Максимальное энерговыделение для пластов КрII+АБ наступает через 29 лет отработки и равен 5.7 Дж/100 м². Для сочетания пластов КрII+Вк параметр P_0 имел максимум в 60 лет и равен 3.3 Дж/100 м² [4]. При привлечении новых данных за последние восемь лет с использованием предложенной методики были получены новые зависимости средней плотности выделения сейсмической энергии от возраста горных выработок. Графики представлены на рис. 1. Исходные данные аппроксимировались функцией ползучести, описанной в работе [4].

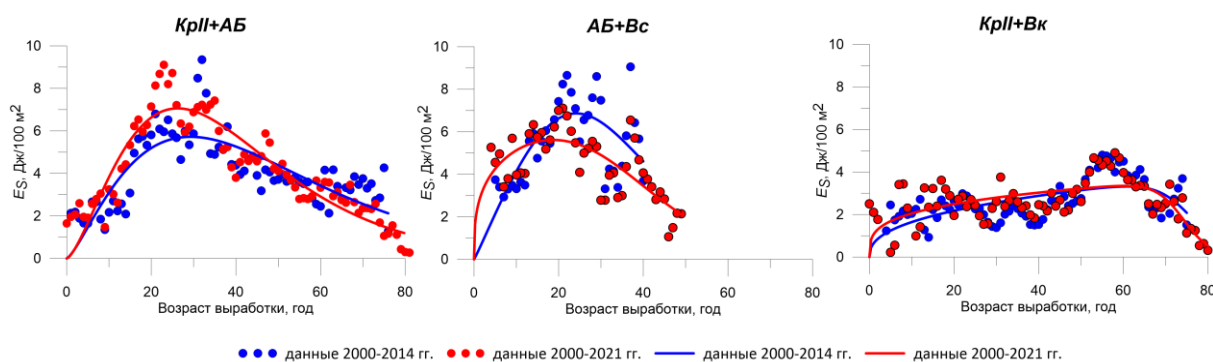


Рис. 1. Зависимость плотности выделения сейсмической энергии от возраста горных выработок при двухпластовой отработке для шахтного поля СКРУ-1

Рассматривая рисунок 1, можно отметить совпадение графиков по данным 2000-2014 гг. и по 2000-2021 гг. для сочетаний пластов КрII+АБ и КрII+Вк, и различие графиков для АБ+Вс. Также необходимо отметить, что сами графики стали более информативными в связи с увеличением исследуемого временного интервала. По обновленным данным, максимум энерговыделения для КрII+АБ достигается в возрасте 26 лет и равен 6.6 Дж/100 м². Для АБ+Вс максимум данного параметра наблюдается через 18 лет и достигает значения $P_0 = 5.6$ Дж/100 м². Рассматривая график для карналлитового пласта Вк с совместной отработкой с сивьвинитовым пластом КрII, следует заметить, что средний уровень плотности выделения сейсмической энергии ниже, чем для чисто сивьвинитовых пластов (практически в два раза). Максимум сдвигается в более поздние года ($P_0 = 3.3$ Дж/100 м² в возрасте 60 лет). Для дальнейшего использования полученных данных для прогноза, были найдены параметры модели (1) отдельно для сивьвинитовых и карналлитовых пластов (таблица 1). В таблице ($t - t_0$) – время действия фактора в годах, начиная с момента t_0 – начала отработки продуктивного пласта. При $t < t_0$ (до начала отработки продуктивных пластов), сейсмическая активность равна нулю.

Количество отработанных пластов

На руднике СКРУ-1 Верхнекамского месторождения одновременно ведется отработка руды на трех продуктивных пластах (КрII, АБ, В), при этом пласт В может быть как сивьвинитовым, так и карналлитовым. Камеры на разных пластах имеют в основном соосное расположение. Т.е. на изучаемом руднике существует 11 вариантов разных сочетаний обрабатываемых пластов. Однопластовая отработка по пластам: КрII, АБ, Вc и Вк; двухпластовая – КрII+АБ, КрII+Вc, КрII+Вк, АБ+Вc и АБ+Вк; трехпластовая – КрII+АБ+Вc и КрII+АБ+Вк. В таблице 2 представлены площади различных сочетаний обрабатываемых пластов, а также процент от общей площади (при условии

наличия исходных горнотехнических данных). При двух- и трехпластовой отработке учитывались минимальные геометрические параметры камеры.

Результаты изучения фактора закладки по данным с 2000 по 2014 гг. представлены в работе [4]. Согласно им, двухпластовая отработка является увеличивающим сейсмичность фактором (в 1.22 раза), а трехпластовая наоборот сдерживающим фактором (сейсмичность уменьшается в 0.67 раз). Следует обратить внимание, что в оценке данного фактора участвовали только те камеры, где не выполнялись закладочные работы (или брался временной интервал между отработкой и закладкой). Помимо этого учитывалась поправка за возраст отработки для сильвинитовых и карналлитовых пластов [4]. Новые модернизированные данные с использованием информации по микросейсмичности на руднике СКРУ-1 представлены на рисунке 2.

Таблица 1

Параметры математической модели прогноза для рудника СКРУ-1 по данным 2000-2021 гг.

Фактор	Зона/Пласт	P_0 , Дж/м ²	$U(t, t_0)$	График $U(t, t_0)$
Возраст горных выработок	Карналлитовые пласты	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$\frac{0.32 \cdot (t - t_0)^{0.28}}{1 + e^{(-22.18 + 0.3 \cdot (t - t_0))}}$	
	Сильвинитовые пласты	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$\frac{0.28 \cdot (t - t_0)^{0.79}}{1 + e^{(-0.29 + 0.05 \cdot (t - t_0))}}$	
Сухая закладка	Сильвинитовые пласты	$5.1 \cdot 10^{-2}$	$\frac{1}{1 + e^{(-27.20 + 0.60 \cdot (t - t_0))}}$	
	Карналлитовые пласты	$5.1 \cdot 10^{-2}$	$\frac{1.11}{1 + e^{(-2.21 + 0.04 \cdot (t - t_0))}}$	
Гидравлическая закладка	КрII	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$\frac{1}{1 + e^{(-11.93 + 0.57 \cdot (t - t_0))}}$	

Таблица 2

Сведения о площадях участков с отдельной и совместной отработкой пластов (по состоянию на январь 2022 года)

Пласт	Общая площадь отработки в руднике, км ²	Доля от общей площади, %
АБ	0.67	5.30
КрII	4.49	35.49
Вс	0.19	1.50
Вк	0.51	4.03
АБ+Вк	0.07	0.55
АБ+Вс	0.36	2.85
Кр2+Вк	1.29	10.20
Кр2+АБ	4.83	38.18
Кр2+Вс	0.01	0.08
Кр2+АБ+Вк	0.13	1.03
Кр2+АБ+Вс	0.1	0.79

Рассматривая рисунок 2, можно отметить, что подсчитаны значения средней плотности выделения сейсмической энергии для ранее невыявленных сочетаний пластов: Вс, Вк, КрII+Вс, АБ+Вк и КрII+АБ+Вс. Цифрами на графике указано количество значений, взятых для осреднения. При этом очевидно, что новые данные имеют низкую представительность. Также необходимо признать, что нет определенной зависимости среднего показателя сейсмичности от количества обрабатываемых пластов. Сравнивая двух- и трехпластовую обработку с однопластовой по данным 2000-2021 гг., следует заметить, что тенденция, выявленная ранее, не прослеживается: двухпластовая обработка дает снижение сейсмичности в 0.85, а трехпластовая повышение в 1.1 раза. Такое несовпадение результатов при обновлении параметров модели говорит о неустойчивом характере данного фактора, что введет к невозможности его учета при дальнейшем прогнозе.

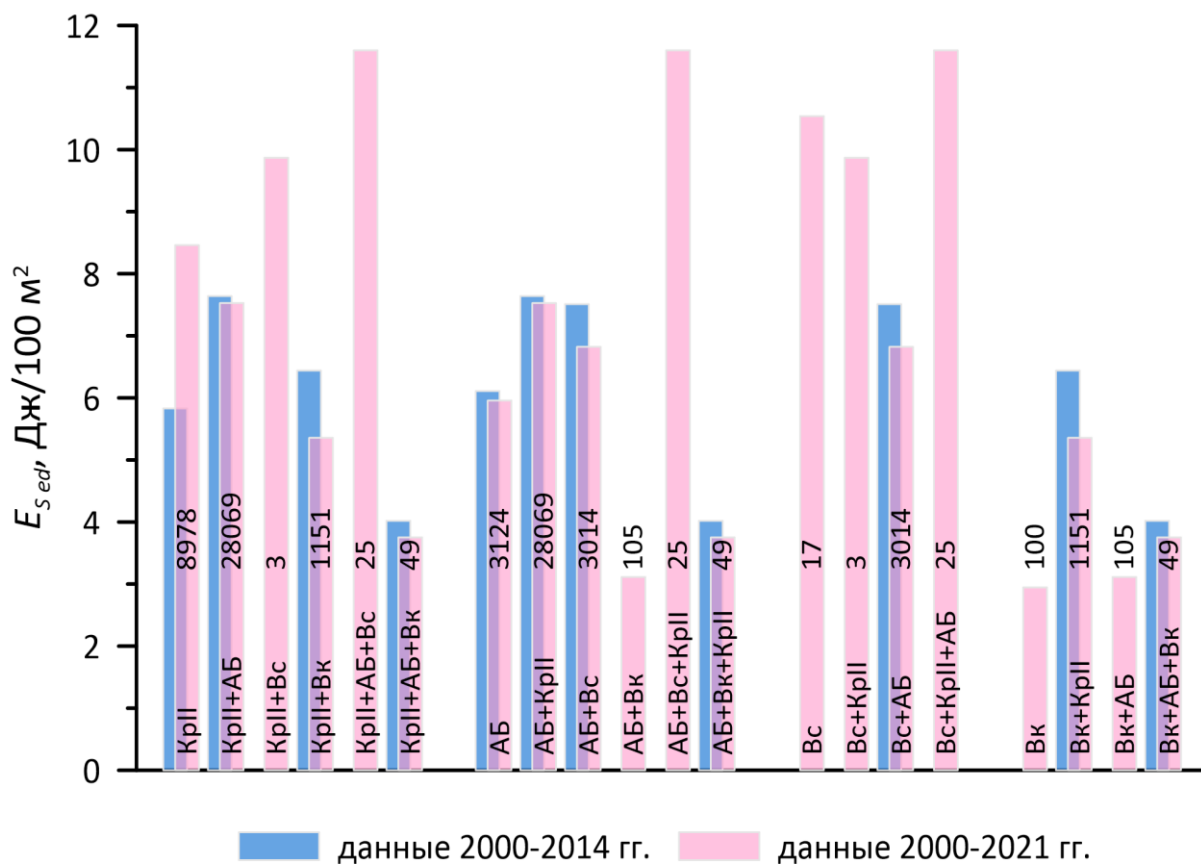


Рис. 2. Зависимость средней плотности выделения сейсмической энергии от обработки продуктивных пластов для шахтного поля СКРУ-1

Закладочные работы

Закладочные работы на калийных рудниках применяют для уменьшения деформаций водозащитной толщи с целью сохранения рудников от затопления и для уменьшения оседания земной поверхности под городской застройкой и промышленными объектами. Также закладка позволяет увеличить объем извлекаемой руды, улучшить условия проветривания горных выработок, уменьшить площадь земель, отведённых под солеотвалы. В настоящее время на руднике СКРУ-1 закладку проводят двумя способами: гидравлическим и механическим (сухие отходы). Согласно указаниям по защите рудников от затопления, закладка обязательна на двух пластах при трехпластовой разработке, а также при ведении очистных работ под городской застройкой [9]. В таблице 3 приведены сведения о

площадах территории рудника СКРУ-1. В соответствии с таблицей, пласт КрII заложен более чем на 70%. Большая часть этой территории заложена с помощью гидравлической закладки. Пласт АБ заложен только наполовину. При этом доля сухого материала больше чем гидравлического. Практически полностью заложеным является пласт Вк. На нем использована в основном сухая закладка, она достигает 64% от общей площади.

Таблица 3

Сведения о площадях исследуемых участков
(по состоянию на январь 2022 года)

Рудник	Пласт	Площадь, км ²	Закладка				
			км ² (%) нет за- кладки	км ² (%) сухая за- кладка	км ² (%) гидравли- ческая за- кладка	км ² (%) Сухая+ гидравлическая закладка	км ² (%) рассол
СКРУ-1	КрII	12.4	3.47 (27.98%)	3.11 (25.08%)	4.45 (35.89%)	1.20 (9.68%)	0.17 (1.37%)
	АБ	7.65	3.98 (52.03%)	1.88 (24.58%)	1.44 (18.82%)	0.28 (3.66%)	0.07 (0.91%)
	Вс	0.72	0.25 (34.72%)	0.23 (31.95%)	0.16 (22.22%)	0.08 (11.11%)	-
	Вк	2.5	0.08 (3.2%)	1.60 (64%)	0.77 (30.8%)	0.05 (2%)	

В работе [4] приведены результаты по изучению фактора закладки, полученные по сейсмическим каталогам за 2000-2014 гг. для рудника СКРУ-1. В соответствии с этими данными были найдены зависимости возраста и типа закладочного материала только для сильвинитового пласта КрII. При этом было установлено, что сухая и гидравлическая закладка приводит к снижению сейсмичности приблизительно через 25 лет.

При привлечении новых данных за последние восемь лет также была получена зависимость E_{s_ed} от возраста сухой закладки для пласта КрII (рис. 3). E_{s_ed} – скорректированная за возраст выработок плотность выделения сейсмической энергии. Корректировка данного параметра необходима для возможности сопоставления данных с разновозрастными выработками, т.е. каждое значение сейсмической активности было пересчитано на дату его ожидаемого максимального уровня [4]. Проанализировав данный рисунок, можно отметить, что конфигурация графиков сухой закладки по старым и новым данным разная. Параметр P_0 увеличился в два раза, постепенное затухание сейсмического процесса происходит не через 25 лет, а через 28.

Дополнительно были построены графики зависимости параметра сейсмичности от возраста сухой закладки для пластов АБ, Вс и Вк (рис. 4). Согласно полученным данным следует заметить, что значение P_0 для всех трех пластов практически одинаково. На пластах АБ и Вс сейсмическая активность снижается в два раза примерно через 35-40 лет. Для карналлитового пласта Вк можно отметить, что в первые 15 лет нет стабильной зависимости. Далее постепенная стабилизация и выравнивание графика происходит к 20 годам и сохраняется в течение последующих

лет. К 60 годам происходит заметное снижение параметра E_{s_ed} практически в два раза.

Рассматривая все полученные данные, были найдены параметры математической модели для фактора закладки, отдельно для сухой материала по сильвинитовым пластами и отдельно для карналлитового пласта Вк. В связи с тем, что по гидравлической закладке не было достаточных данных для построения, были взяты параметры, полученные по предыдущим данным за 2000 по 2014 гг.

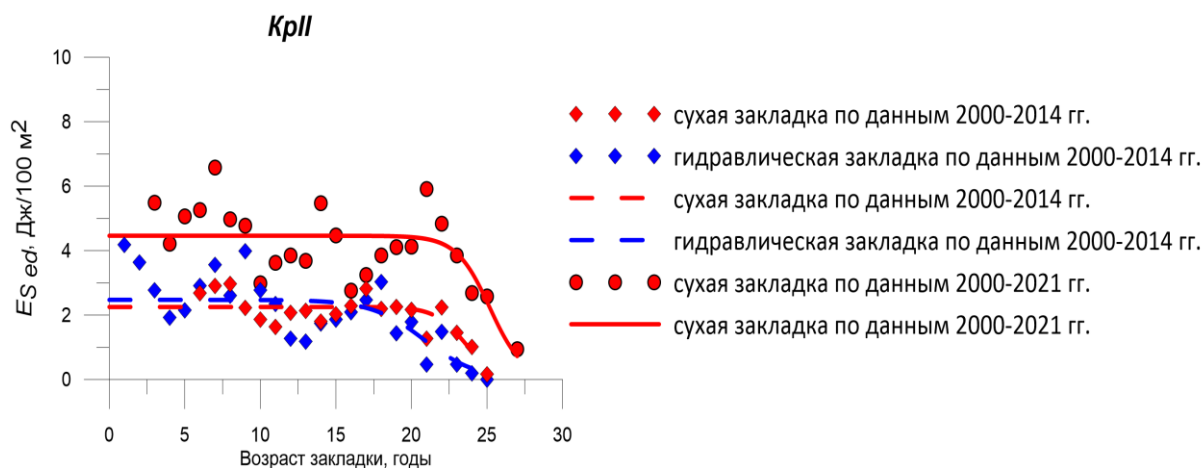


Рис. 3. Зависимости плотности выделения сейсмической энергии от возраста закладочных работ для пласта КрII рудника СКРУ-1

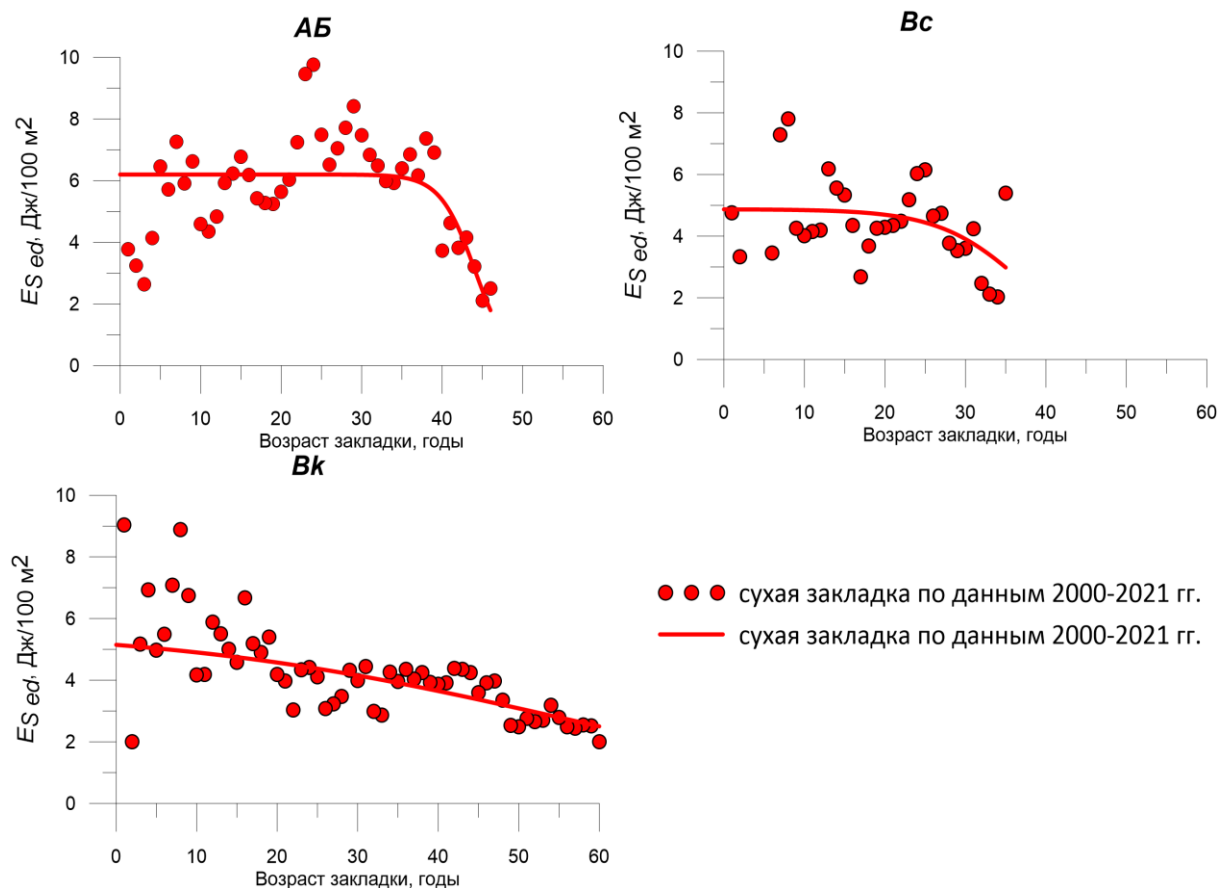


Рис. 4. Зависимости плотности выделения сейсмической энергии от возраста сухой закладки для пласта АБ, Вс и Вк для рудника СКРУ-1

Выводы

Новые горнотехнические и сейсмические данные за последние восемь лет показали изменения в параметрах прогностической модели. Были выявлены новые зависимости сухой закладки от ее возраста для пластов АБ, Вк и Вс. Модернизированные параметры способствуют дальнейшему более точному и своевременному прогнозу сейсмической активности, а также позволят выделить наиболее опасные участки отработки на изучаемом руднике на ближайшие один-два года.

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).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белкин В.В., Коноплев А.В., Ковин О.Н., Наумова О.Б. Мониторинг и оценка состояния геологической среды Верхнекамского соленосного бассейна // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 663.
2. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Гравиметрический мониторинг территории разработки Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 22-25.
3. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Гравиметрический мониторинг потенциально-опасных участков Верхнекамского месторождения калийных солей // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2019. – № 2 (39). – С. 187-194.
4. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах: Т. 1 / отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. – 549 с.
5. Гришко С.В. Результаты спутникового мониторинга территории Верхнекамского месторождения калийных солей // Master's Journal. – 2015. – № 1. – С. 231-237.
6. 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.
7. 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.
8. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 25-29.
9. Методические рекомендации к «Указаниям по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей»: введ. в действие с 30.03.2017 г., в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. –
10. Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г., Верхоланцев А.В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горн. журн. – 2018. – № 6. – С. 25-29. – DOI: 10.17580/gzh.2018.06.05.

УДК 550.831.017

DOI:10.7242/echo.2022.1.17

РАЗВИТИЕ ВЕКТОРНОГО МЕТОДА ТРАНСФОРМАЦИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К РЕГИОНАЛЬНЫМ ПРОФИЛЯМ

Г.В. Простолупов
Горный институт УрО РАН, г.Пермь

Аннотация: Рассмотрено программное и математическое развитие метода «Полюс», приведены примеры применения метода на сейсмическом профиле в области интенсивной солянокупольной тектоники и на профиле глубинного сейсмического зондирования «Кварц», в результате по локализации полюсов сделан прогноз вероятного местоположения соляного купола, предположительно выявлена закономер-