

Т.В. Верхованцева, Р.А. Дягилев

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Сейсмологические наблюдения на калийных рудниках Верхнекамского месторождения начались в 1995 г. после Соликамского землетрясения, эпицентр которого располагался на отработанной территории калийного рудника СКРУ-2. За двадцатилетний период мониторинга получен богатый материал о природе регистрируемых сейсмических явлений, о пространственно-временных закономерностях сейсмичности, о факторах, влияющих на ее уровень. Описано влияние таких факторов, как наличие заложённых камер, возраст и тип закладки. Выполнена параметризация математической модели, описывающей влияние закладки на уровень сейсмичности. Показано, что гидравлическая закладка сводит к минимальному уровню сейсмичности калийных рудников к 25 годам, а сухая – к 30 годам.

Ключевые слова: калийный рудник, сейсмологический мониторинг, математическая модель, параметризация, закладочные работы.

Введение

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) является одним из крупнейших в мире. На месторождении обрабатываются три промышленных пласта: КрII, АБ и В. Пласты КрII и АБ сильвинитового состава, пласт В может быть как сильвинитовым, так и карналлитовым.

Сейсмологический мониторинг проводится на территории месторождения с 1995 г. Эти наблюдения дают большое количество информации о процессах, связанных с деформированием и разрушением массива пород, о пространственно-временных закономерностях, о факторах, влияющих на уровень сейсмической активности. В работе [1] представлена математическая модель, описывающая влияние различных факторов во времени, а также приведены расчеты для трех из них: проходящие волны от удаленных землетрясений, взрывные работы на руднике, возраст горных выработок. Сама математическая модель имеет вид:

$$P(t, t_0) = P_0 \cdot k \cdot F(t, t_0) \quad (1)$$

где P – параметр, описывающий интенсивность сейсмических процессов (плотность выделения энергии или плотность событий); P_0 – первоначальное или максимальное значение данного параметра (в зависимости от фактора); k – масштабный коэффициент, который задает значимость вносимых фактором изменений; $F(t, t_0)$ – зависимость, описывающая характер влияния фактора во времени, нормированная на диапазон от 0 до 1; t_0 – время начала действия фактора.

Как показали расчеты [1], для некоторых факторов масштабный коэффициент k определить невозможно, так как часто при $t < t_0$ (до начала действия фактора) сейсмической активности не наблюдается совсем. В связи с этим целесообразней видоизменить модель, сделав коэффициент k частью функции $F(t, t_0)$, сняв при этом жесткое ограничение на диапазон ее нормировки. Таким образом, новая математическая модель будет иметь вид:

$$P(t, t_0) = P_0 \cdot U(t, t_0) \quad (2)$$

где $U(t, t_0)$ – зависимость, описывающая изменения влияющего фактора во времени, чьи значения на некотором временном интервале, доступном для исследования, нормированы на диапазон от 0 до 1. При условии, что действие фактора происходит разово, функция $U(t, t_0)$ будет иметь смысл масштабного коэффициента, который указывает на значимость вносимых фактором изменений (сдерживающий или усиливающий фактор).

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на сейсмический режим калийных рудников, является наличие горных выработок, то есть вариации сейсмической активности должны быть в значительной степени обусловлены изменениями в горнотехнических условиях. Для математического моделирования влияния горнотехнических параметров на сейсмический режим рудников необходимо найти значение P_0 и $U(t, t_0)$. В работе [2] представлена параметризация модели для двух горнотехнических факторов: возраст горных выработок и количество отработанных пластов. Не менее значимым фактором является также наличие закладки и тип закладочного материала.

Закладочные работы 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, отведенных под солеотвалы. В качестве закладочного материала используют отходы обогатительных фабрик (солеот-

ходы), представленные каменной солью (95–97%), примесями ангидрита и нерастворимыми материалами. В последние годы также стали использовать глинисто-солевые шламы. В настоящее время около 85% объемов закладки ведут гидравлическим способом, а остальные 15% механическим [3]. Согласно [4], закладка камер как мера предотвращения затопления рудников обязательна на двух пластах при трехпластовой разработке, а также при ведении очистных работ под городской застройкой.

После возведения закладочного массива механическим или гидравлическим способом в нем происходит усадка массива в вертикальном и горизонтальном направлениях. Кроме этого, массив испытывает давление от собственного веса, что приводит к дополнительной усадке в вертикальном направлении. В [5] сказано, что усадка при сухой закладке на ВКМКС заканчивается в основном за 8–12 месяцев. После усадки происходит упрочнение массива. Данный процесс происходит значительно медленнее. Согласно [5] упрочнение гидрозакладочного массива из мелкозернистых солеотходов происходит через 15 лет.

Ранее в работе [6] представлены первые попытки оценить влияние закладочных работ на уровень сейсмической активности. Было установлено, что в среднем проведение закладочных работ приводит к снижению выделения сейсмической энергии в 1,3–2 раза. Однако эти результаты не учитывают множество факторов: возраст камер, возраст и тип закладочного материала. Цель данной работы – изучить влияние сухой и гидравлической закладки на подработанный массив с течением времени, сравнить их влияние между собой, а также определить параметры математической модели (2).

Методика исследования

В качестве исходных данных использовались данные по горнотехническим параметрам отработки месторождения, представленные ПАО «Уралкалий». Эти пространственные данные включают в себя разнородную информацию: рудник, отработываемый пласт, панель, блок, номер камеры, параметры камеры, год отработки, год и тип закладочного материала. В качестве параметра, характеризующего сейсмичность, использовались данные о плотности выделения сейсмической энергии E_s , рассчитанные для временного интервала в один год. Для достижения поставленной цели была использована методика, представленная в работах [1, 2]. Она основана на пространственном анализе данных, а именно на инструменте «Зональная стати-

стика» программного продукта ArcGIS. Данный инструмент вычисляет статистику для каждой зоны, определенной набором данных зоны на основе значений из другого набора данных (растр значений). В качестве зон были выбраны данные по горнотехническим параметрам, в качестве растра значений – непрерывные карты плотности выделения сейсмической энергии. Среднее значение ES рассчитывалось для каждой камеры, предварительно присваивая ей ID-номер для идентификации. Расчеты проводились для двух рудников (СКРУ-1 и СКРУ-2). На выходе для каждой камеры (полигона) мы имеем набор данных: ID, год отработки, год и тип закладки, площадь полигона и параметр ES для каждого года с 2000 по 2014.

Для возможности дальнейшего сопоставления разновозрастных данных по выработкам в параметры сейсмичности вводилась поправка за возраст выработок, согласно зависимостям, выявленным ранее [2]. Данные зависимости (рис. 1) показывают, что возрастание микросейсмической активности происходит неравномерно и достигает максимума через несколько десятков лет после отработки в зависимости от пласта и рудника. После идет постепенное затухание сейсмического процесса.

Таким образом, каждое полученное значение параметра сейсмической активности можно пересчитать на дату его ожидаемого максимального уровня по формуле:

$$E_{S_{ed}} = \frac{E_s(t)}{U(t)}, \text{ при } t > 0 \quad (4)$$

где $E_{S_{ed}}$ – скорректированный параметр сейсмичности; $E_s(t)$ – значение плотности выделения энергии в выработке возраста t , полученное инструментом «Зональная статистика»; $U(t)$ – зависимость плотности выделения сейсмической энергии от возраста горных выработок, нормированная на диапазон от 0 до 1 (рис. 1); t – время действия фактора в годах.

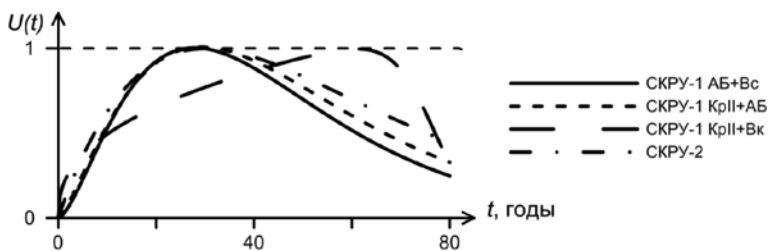


Рис. 1. Обобщенные графики зависимости плотности выделения сейсмической энергии от возраста горных выработок

На рис. 2. приведены гистограммы распределения количества значений (число полигонов шахтного поля с полным набором данных о закладке и параметрах сейсмичности) относительно τ – интервала времени между отработкой и закладкой. Оси графиков приведены к единому масштабу. По этим данным можно сделать вывод, что сухая закладка, как правило, выполняется сразу после отработки камеры и лишь иногда спустя несколько лет. Гидравлическую закладку проводят обычно через 5–10 лет. Для корректного анализа влияния закладочных работ и сравнения двух видов закладки были использованы данные

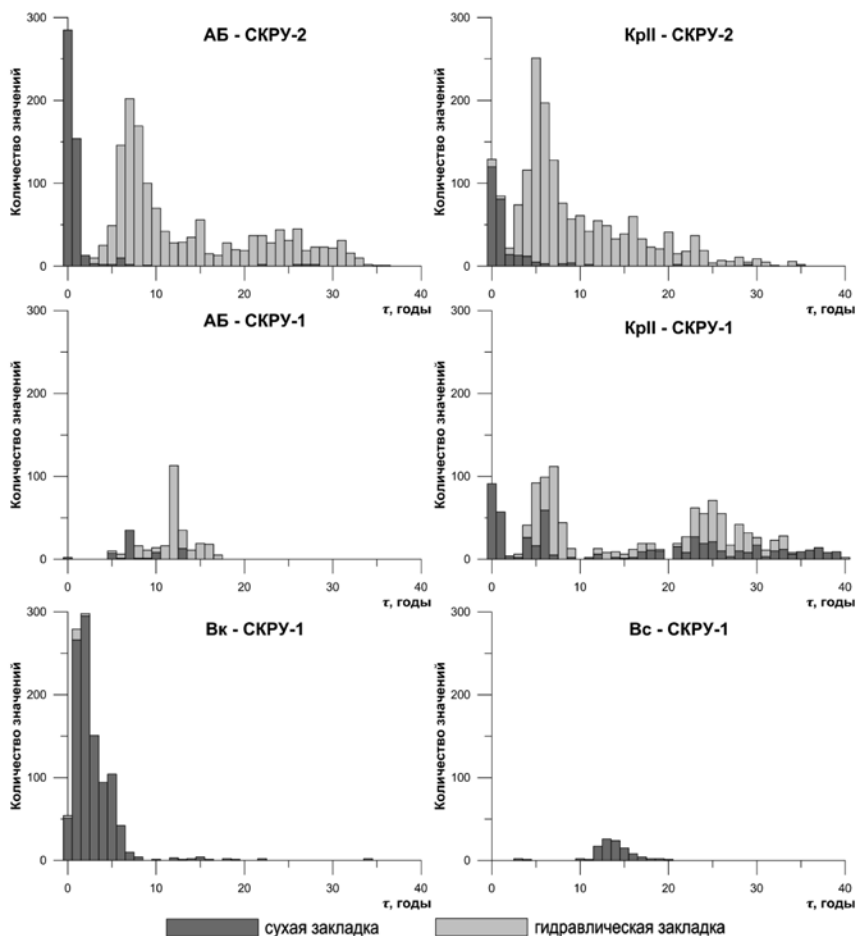


Рис. 2. Гистограммы распределения количества значений относительно интервала времени между отработкой и закладкой

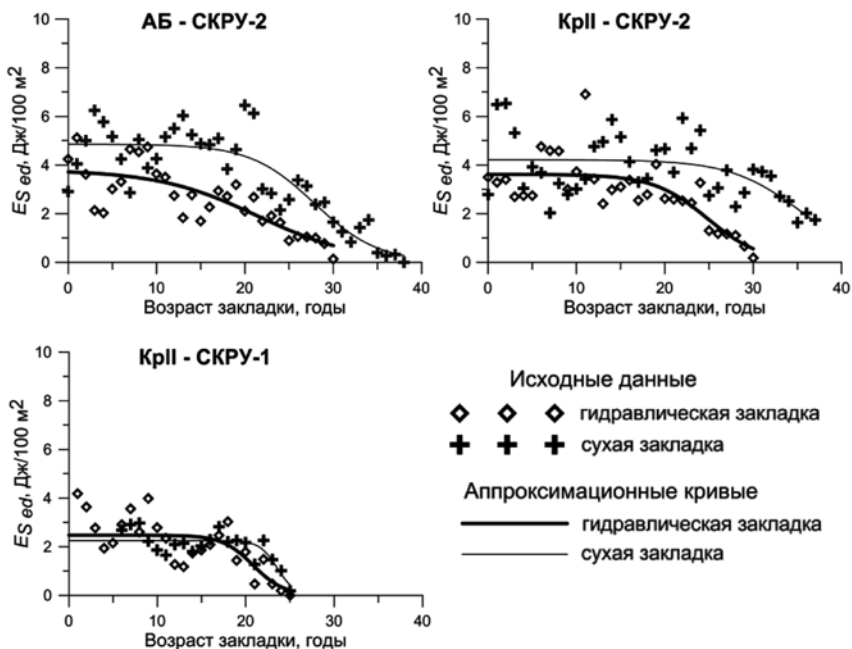


Рис. 3. Зависимости плотности выделения сейсмической энергии от возраста закладочных работ

по пластам АБ и КрII для рудника СКРУ-1, а также по пласту КрII рудника СКРУ-1. Для других пластов достаточного количества данных для построения таких зависимостей не имеется.

Результаты

Зависимости средней плотности выделения сейсмической активности от возраста закладки с учетом корректировки возраста выработок представлены на рис. 3. Анализ этих данных показывает, что для рудника СКРУ-2 гидравлическая закладка дает более быстрое затухание (уменьшение) средней плотности выделения сейсмической энергии, чем сухая (в среднем на 10 лет быстрее). Гидравлическая закладка приводит к минимальным значениям энергии сейсмических событий через 30 лет, а сухая – через 40 лет. Графики, полученные для рудника СКРУ-1, отличаются более низким значением $E_{S\ ed}$ при $t = 0$. Сейсмические процессы здесь затухают примерно через 25 лет независимо от типа закладочного материала. Для возможности оценки влияния фактора закладки во времени фактические

Параметры математической модели для фактора закладки

Рудник	Пласт	Тип закладки	P_0 , Дж/100 м ²	$U(t, t_0)$
СКРУ-1	КрII	сухая	2,252	$\frac{1}{1 + e^{(-23,402+0,993(t-t_0))}}$
		гидравлическая	2,472	$\frac{1}{1 + e^{(-11,929+0,572(t-t_0))}}$
СКРУ-2	АБ	сухая	4,855	$\frac{1}{1 + e^{(-7,714+0,277(t-t_0))}}$
		гидравлическая	3,798	$\frac{1}{1 + e^{(-3,794+0,177(t-t_0))}}$
	КрII	сухая	4,213	$\frac{1}{1 + e^{(-8,839+0,250(t-t_0))}}$
		гидравлическая	3,613	$\frac{1}{1 + e^{(-8,813+0,327(t-t_0))}}$

значения $E_{s\text{cd}}$ были аппроксимированы знаменателем функции ползучести, т.к. именно он описывает затухающий процесс:

$$U(t) = \frac{1}{(1 + e^{\rho - \beta t})} \quad (3)$$

где ρ , β – реологические параметры среды. В таблице приведены параметры математической модели (2) для фактора закладки. Здесь $U(t, t_0)$ – зависимость средней плотности выделения сейсмической энергии от возраста закладочных работ; $(t - t_0)$ – время действия фактора в годах, начиная с момента t_0 – времени проведения закладочных работ; P_0 имеет смысл значения плотности выделения сейсмической энергии на момент закладки.

Полученные результаты подтверждают данные о том, что закладка действует не мгновенно, а спустя несколько лет, при этом массив испытывает усадку и упрочнение. Для сравнения эффективности двух способов закладки были построены графики величины k , равной отношению зависимостей $U(t, t_0)$, характеризующих влияние гидравлической и сухой закладки на рудниках (рис. 4). Графики показывают, что в течение первых 10–15 лет значительных различий влияния типа закладочного материала не наблюдается ($k \approx 1$). Двукратное превосходство гидравлической закладки ($k = 0,5$) достигается уже через 20–25 лет и со временем только увеличивается (k снижается).

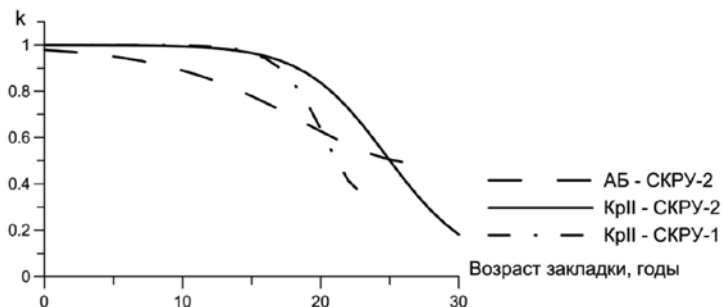


Рис. 4. Графики сравнения двух типов закладочного материала

Заключение

Изучение долговременного влияния закладочных работ на сейсмичность калийных рудников показало, что данный фактор способствует стабилизации подработанного массива не посредством одномоментного снижения интенсивности процессов разрушения, а через сокращение периода их проявления после закладки. Наличие выработок с различным типом закладочного материала позволило установить, что гидрозакладка приводит к более раннему (примерно на 10 лет раньше) затуханию сейсмичности. Впервые получены зависимости, описывающие влияние закладки на процесс разрушения отработанных пластов на калийных рудниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верхоланцева Т. В., Дягилев Р. А.* Параметризация модели влияния различных факторов на сейсмичность калийных рудников // Геофизика. — 2015. — № 5 — С. 12–18.
2. *Верхоланцева Т. В., Дягилев Р. А.* Количественная оценка влияния горнотехнических параметров отработки месторождения на сейсмический режим // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. — М.: ГЕОС, 2015. — С. 214–220.
3. *Старков Л. И., Земсков А. Н., Кондрашев П. И.* Развитие механизированной разработки калийных руд. — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2007. — 522 с.
4. *Указания по защите рудников от затопления и охране подготавливаемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент).* — СПб.: ВНИИГ, 2008.
5. *Борзаковский Б. А., Папулов Л. М.* Закладочные работы на Верхнекамских калийных рудниках. — М.: Недра, 1994. — 234 с.
6. *Shulakov D. Y., Verkholanitseva T. V.* Relation between microseismic activity and parameters of mining in the Verkhnekamskoye potash deposit // Rockbursts and seismicity in mines. Proceeding of the 8th International Symposium. Obninsk — Perm, 2013. — Pp. 505–510. **IVAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Верхоланцева Татьяна Викторовна*¹ – младший научный сотрудник, e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com,
*Дягилев Руслан Андреевич*¹ – кандидат физико-математических наук, доцент, зав. лабораторией, e-mail: dr@mi-perm.ru,
¹ Горный институт Уральского отделения РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 222–224.

UDC
550.34.01

T.V. Verkholantseva, R.A. Dyagilev **INFLUENCE OF BACKFILLING** **ON SEISMIC ACTIVITY IN POTASH MINES**

The seismological observations at the Verkhnekamskoye deposit began after Solikamsk earthquake in 1995. Epicenter of this earthquake was located at mined-out area of the deposit. Seismic monitoring allowed collecting data about source mechanisms of recorded seismic events, spatial-temporal characteristic of seismicity, factors influencing on seismic activity. This article describes the influence of backfilling, its age and type on seismicity in potash mines. It is discussed the way to evaluate parameters of the model, describing such influence. Analysis of the data shows that hydraulic backfilling reduces seismic activity in 25 years, but dry backfilling – in 30 years.

Key words: potash mines, seismological monitoring, numerical model, parametrisation, backfilling.

AUTHORS

*Verkholantseva T.V.*¹, Junior Researcher, e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com,
*Dyagilev R.A.*¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: dr@mi-perm.ru,
¹ Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

REFERENCES

1. Verkholantseva T. V., Dyagilev R. A. *Geofizika*. 2015, no 5, pp. 12–18.
2. Verkholantseva T. V., Dyagilev R. A. *Triggernye efekty v geosistemakh. Materialy tret'ego Vserossiyskogo seminara-soveshchaniya*. Pod red. V. V. Adushkina, G. G. Kocharyana (Trigger responses in geospheres: Proceedings of the third All-Russian alignment meeting. Adushkin V. V., Kocharyan G. G. (Eds.)), Moscow, GEOS, 2015, pp. 214–220.
3. Starkov L. I., Zemskov A. N., Kondrashev P. I. *Razvitie mekhanizirovannoy razrabotki kaliynykh rud* (The development of machine mining of potash ore), Perm, Izd-vo PGTU, 2007, 522 p.
4. *Ukazaniya po zashchite rudnikov ot zatopeniya i okhrane podrabatyvaemykh ob'ektov v usloviyakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley (tekhnologicheskii reglament* (Instruction on flood protection of mines and preservation of undermined objects at the Verkhnekamskoye potash deposit (operating regulations)), Saint-Petersburg, VNIIG, 2008.
5. Borzakovskiy B. A., Papulov L. M. *Zakladochnye raboty na Verkhnekamskikh kaliynykh rudnikakh* (Stowing operations in Upper Kama potash mines), Moscow, Nedra, 1994, 234 p.
6. Shulakov D. Y., Verkholantseva T. V. Relation between microseismic activity and parameters of mining in the Verkhnekamskoye potash deposit. *Rockbursts and seismicity in mines. Proceeding of the 8th International Symposium*. Obninsk Perm, 2013, pp. 505–510.