

**О ВЗАИМОСВЯЗИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И КОЛИЧЕСТВА
ОТРАБОТАННЫХ ПЛАСТОВ В КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ***Верхоланцева Т.В., Дягилев Р.А.**Горный институт УрО РАН, г. Пермь, tati.verkholantseva@gmail.com, dr@mi-perm.ru***Введение**

Безопасная разработка любого месторождения полезного ископаемого обеспечивается комплексом горнотехнических мероприятий и геофизических исследований. Сейсмологический мониторинг является одним из методов исследования и контроля напряженно-деформированного состояния подработанного массива. Так, на Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) сейсмологический контроль проводится с 1995 года. Всего на рудниках ВКМКС в период с 1995 г. до начала 2015 г. зафиксировано более 11 тысяч сейсмических событий с энергией от единиц Дж до 100 кДж.

В ходе наблюдений установлено [8], что уровень сейсмичности зависит от целого ряда горнотехнических параметров отработки месторождения (возраст горных выработок, количество отрабатываемых пластов, проведение закладочных работ, их возраст и др.). Локальное повышение выделившейся сейсмической энергии отмечается и при проведении взрывных работ [4]. Также на сейсмичность в руднике оказывают влияние природные факторы. Среди них можно выделить воздействия удаленных землетрясений. Прохождение сейсмических волн от сильных удаленных очагов через подработанный соляной массив нарушает его неустойчивое равновесие и вызывает активизацию сейсмических процессов в ослабленных зонах [1].

Полученные результаты в работах [1, 4, 8] позволили выразить влияние различных факторов в виде математической модели [2], которая имеет вид:

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

где P – параметр сейсмичности (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.

При определении количественных значений параметров модели (P_0 , k , $F(t, t_0)$) появится возможность прогнозировать негативные явления на новых участках ведения горных работ, заранее идентифицировать проблемные участки и планировать на них превентивные мероприятия.

Одним из основных факторов, влияющих на сейсмический режим калийных рудников, является наличие горных выработок, то есть вариации сейсмической активности должны быть в значительной степени обусловлены изменениями в горнотехнических условиях, и анализировать динамику сейсмической активности следует в комплексе с режимом ведения горных работ. Стоит отметить, что схема разработки месторождения, используемая на рудниках ВКМКС, достаточно сложна, и прямое сопоставление всех горнотехнических условий с микросейсмической активностью не позволяет сходу решить поставленную задачу. Для того чтобы попытаться различить влияние какого-то одного фактора, необходимо изолировать его от остальных. Сейсмичность на калийных рудниках, как показывает практика наблюдений, не связана с ведением текущих горных работ, но реализуется на отработанных участках позже, в течение нескольких лет. Поэтому главным среди горнотехнических факторов является возраст горных выработок. В работе [3] получены зависимости, описывающие влияние данного фактора во времени для первого (СКРУ-1) и для второго Соликамского рудоуправления (СКРУ-2). Схематично результат можно представить в виде графика, приведенного на рис. 1. Данные результаты показали, что в целом существенное возрастание микросейсмической активности происходит через 20-40 лет после отработки, в зависимости от пласта и рудника. Микросейсмическая активность в данном случае отражает процессы деформации и разрушения приконтурного массива.

Следующим значимым горнотехническим фактором, влияющим на уровень сейсмической активности, является количество отработанных пластов и их сочетания. В настоящее время добыча руды ведется на трех продуктивных пластах (КрП, АБ и В), причем извлекаться может от одного до трех пластов в любых комбинациях. Пласт В в разных частях месторождения может быть представлен как силвинитом (Вс), так и карналлитом (Вк). Таким образом, на рудниках ВКМКС

существует 11 вариантов разных сочетаний обрабатываемых пластов. Однопластовая отработка по пластам: КрII, АБ, Вс и Вк; двухпластовая – КрII+АБ, КрII+Вс, КрII+Вк, АБ+Вс и АБ+Вк; трехпластовая – КрII+АБ+Вс и КрII+АБ+Вк

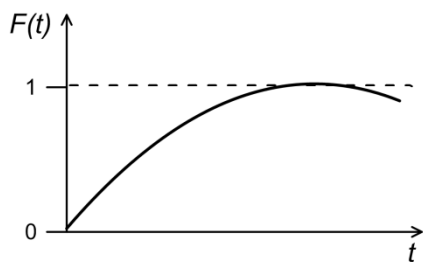


Рис. 1. Обобщенный график зависимости плотности выделения сейсмической энергии от возраста горных выработок

При отработке нескольких пластов междукammerные целики имеют соосное расположение. В таких случаях необходимо вводить ограничения на параметры системы разработки на участках с выявленными или прогнозируемыми аномальными особенностями строения водозащитной толщи (ВЗТ), согласно [6].

Методика исследования

Для проведения расчетов зависимости уровня сейсмической активности от отработки продуктивных пластов был создан проект на основе программного продукта ArcGIS. В качестве параметра, характеризующего сейсмичность, использовались данные о плотности выделения сейсмической энергии E_s [7] по площади месторождения. Для исследования была выбрана территория шахтных полей СКРУ-1 и СКРУ-2, так как для них есть наиболее полные данные по параметрам отработки. Эта территория ограничена, с одной стороны, регистрационными возможностями сейсмической сети, с другой – границами ведения горных работ. Отчасти данные параметры территориально не перекрываются. Области, для которых выполнялся статистический анализ, были выбраны те участки шахтных полей, где выполнялось условие наличия не менее 5 сейсмических событий на участке радиусом 400 м. Из них были исключены участки на северо-восточной окраине шахтного поля СКРУ-2, где сейсмическая активность связана преимущественно с последствиями техногенного землетрясения 1995 года [5].

В качестве горнотехнических параметров использовались исходные данные в формате MapInfo, предоставленные ПАО «Уралкалий» (актуальность на июль 2014 года). При этом для дальнейшей корректной работы с этими данными проводился ряд операций (на основе приложения ArcToolbox):

- Исходные данные в формате MapInfo конвертировались в формат Shape-file;
- Проверялась и исправлялась геометрия, в процессе которой были обнаружены самопересекающиеся полигоны;
- Проверялись и при необходимости исправлялись данные по году отработки, году и типу закладки соответственно журналам по параметрам отработанных камер и закладочных работ;
- Объединялись shape-file по различным продуктивным пластам;
- Для определения влияния каждой отдельной камеры и для подсчета среднего значения плотности выделения сейсмической энергии каждой камере присваивался ID-номер;
- Соединялись данные по закладочным работам и отработанным камерам;

На каждом из этапов проводилась проверка проделанных процедур.

Для определения средней плотности выделения сейсмической энергии для каждой отдельной камеры был использован ГИС-инструмент «зональная статистика». Зональная статистика вычисляет статистику для каждой зоны, определенной набором данных зоны на основе значений из другого набора данных (растр значений). Зона – это все ячейки растра, которые имеют одно значение независимо от того, являются ли они непрерывными или нет. Тип выходных данных определяется типом вычисляемой выбранной статистики и типом входных значений. На выходе для каждой зоны вычисляются минимум, максимум, среднее значение, медиана, диапазон, стандартное отклонение, меньшинство (наименее часто возникающее значение) и большинство (наиболее часто возникающее значение). Необходимо учитывать, что операция выполняется, если площадь отдельно взятой камеры больше одной ячейки растра.

На выходе после всех проделанных манипуляций для каждой камеры мы имеем набор данных (ID, год отработки, год закладки, площадь полигона и параметр E_s для каждого года с 2000 по 2014). Пример представлен в таблице 1. В расчетах учитывались данные только тех камер, где не было произведено закладки территории, или данные в периоды времени, когда камеры не были заложены.

На участках с двух- и трехпластовой отработкой использовались данные, попадающие во временной интервал, начиная с года отработки 1-го пласта, заканчивая датой самой ранней закладки. Для возможности дальнейшего сопоставления данных с разновозрастных выработок в параметры сейсмичности вводилась поправка за возраст выработок, согласно зависимостям выявленным ранее в [3]. При этом каждое значение параметра сейсмической активности было пересчитано на дату его ожидаемого максимального уровня (рис. 1) по формуле:

$$E_{Sed} = \frac{E_S(t)}{F(t)}, \text{ при } t > 0 \quad (2)$$

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

Из анализа были исключены те данные, которые соответствуют периоду, когда закладка была произведена. Результаты расчетов и осреднения представлены на рис. 2.

Таблица 1. Пример полученных данных

ID	Год отработки	Год закладки	Площадь, км ²	E_S 2000	E_S 2001	...	E_S 2014
61	1970	2009	0.0022	5.6814	18.1457	...	10.08
126	1975	0	0.0022	0.8598	8.4986	...	0.14
1272	2008	0	0.0016	0.0830	0.0158	...	0.00
1476	2011	2013	0.0007	0.8275	0.2212	...	0.19

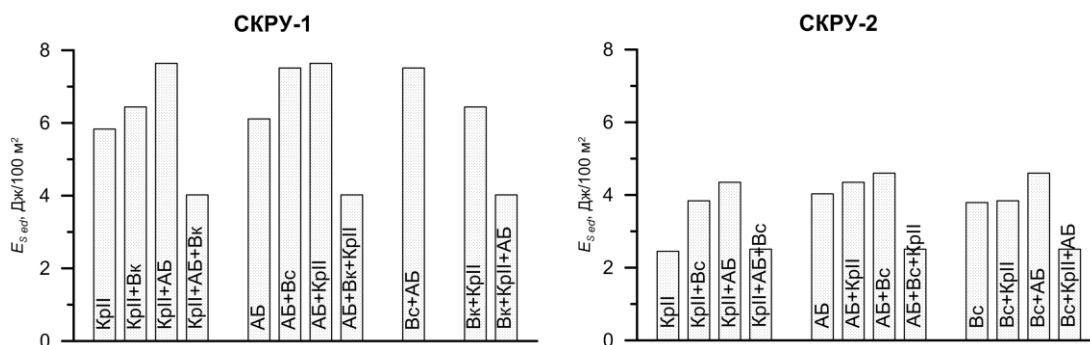


Рис. 2. Зависимость средней плотности выделения сейсмической энергии от отработки продуктивных пластов

Результаты

Проанализировав рис. 2, можно отметить, что для рудника СКРУ-2 средняя плотность выделения сейсмической энергии в два раза ниже, чем для СКРУ-1. Причиной этому могут служить различия горно-геологических условий и физико-механических свойств подверженных разрушению пород. Наименьшим уровнем микросейсмической активности при однопластовой отработке характеризуются выработки по пласту КрII. Поскольку существенных отличий в параметрах отработки данного пласта от других (извлекаемая мощность, коэффициент нагружения целиков) не наблюдается, логично предположить, что пониженный уровень микросейсмической активности обусловлен особенностями физико-механических свойств пород.

При двухпластовой отработке наблюдается повышение уровня сейсмической активности в 1.1-1.8 раз. Вероятно, это связано с повышением степени нагружения целиков и ростом скорости формирования сейсмических очагов. Согласно [6], двухпластовая отработка возможна при толщине водозащитной толщи, равной 80 м, пласты должны иметь степень нагружения междукамерных целиков $C=0.4$ при условии закладки камер по обоим пластам со средней степенью заполнения $A \geq 0.7$ на участках влияния аномальных зон 4 группы. При влиянии аномальных зон 3 группы – $C \leq 0.4$ и $A \geq 0.7$.

Вопреки ожиданиям на участках с трехпластовой отработкой уровень сейсмической активности значительно ниже, чем на участках с одно- и двухпластовой отработкой. Возможно, это связано с низкой представительностью данных, использованных в расчетах, так как доля трехпластовых данных лежит среди самых низких значений (табл.2). В то же время абсолютные значения площади исследуемых камер не всегда пренебрежимо малы, а полученные результаты не зависят от площади, так как сейсмический параметр E_S уже содержит нормировку на площадь. Можно также предположить, что понижение сейсмической энергии при трехпластовой отработке

связано с особыми физико-механическими свойствами пород на данных участках, благодаря которым и стала возможна трехпластовая отработка. Но наиболее вероятной причиной снижения сейсмической активности видится качественное изменение процессов деформации подработанного массива, выражающееся в виде перераспределения энергий между различными видами происходящих разрушений.

Таблица 2. Сведения о площадях исследуемых участков и процент данных, выбранных для статистики

Рудник	СКРУ-1		СКРУ-2	
	Общая площадь исследуемых камер, км ²	Доля выбранных данных, %	Общая площадь исследуемых камер, км ²	Доля выбранных данных, %
АБ	0.19	67.0	0.25	54.9
КрП	1.69	53.5	0.04	18.2
Вс	-	-	0.21	69.9
Вк	0.02	0	-	-
АБ+Вк	0.05	0	-	-
АБ+Вс	0.30	50.8	0.75	45.3
КрП+Вк	0.72	3.5	-	-
КрП+АБ	1.83	79.3	1.48	29.6
КрП+Вс	-	-	0.18	16.3
КрП+АБ+Вк	0.08	8.6	-	-
КрП+АБ+Вс	-	-	0.80	19.5

Согласно (1) первоначальное значение модельного параметра для фактора количества отработанных пластов P_0 для СКРУ-1 равно 5.97 Дж/100 м², для СКРУ-2 – 3.42 Дж/100 м². Масштабный коэффициент k для двухпластовой отработки равен 1.26, для трехпластовой – 0.72.

Заключение

Изучив влияние количества отработанных слоев, можно отметить, что двухпластовая отработка дает заметное повышение среднего уровня сейсмической активности, тогда как трехпластовая, наоборот, способствует ее понижению. Понимание и возможность прогнозировать оба феномена имеют важное практическое значение для обеспечения безопасности отработки калийных рудников. Последний феномен, вероятно, необходимо рассмотреть еще более подробно в комплексе с геомеханическими параметрами, геологическими неоднородностям этой территории, а также с картами аномальных зон в водозащитной толще.

Список литературы

1. Верхоланцев Ф.Г., Белевская М.А. Триггерная сейсмичность на Верхнекамском месторождении калийных солей с 2008 по 2010 год // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 52–55.
2. Верхоланцева Т.В., Дягилев Р.А. Модель влияния различных факторов на техногенную сейсмичность калийных рудников // Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы докладов третьего Всероссийского семинара-совещания. М.: ГЕОС, 2015. С. 21.
3. Верхоланцева Т.В., Дягилев Р.А. Изучение влияния возраста горных выработок на сейсмический режим калийных рудников // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 71–74.
4. Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Верхоланцев А.В., Глебов С.В. Мониторинг сейсмических процессов в калийных рудниках: результаты наблюдения и перспективы развития // Горный журнал, 2013, №6. С. 50–54
5. Маловичко Д.А. О техногенной природе Соликамского землетрясения // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Материалы научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. Пермь: ГИ УрО РАН, 2004. С. 101–104.
6. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). СПб.: ВНИИГ, 2008.
7. Шулаков Д.Ю. Методика расчета карт плотности выделения сейсмической энергии в условиях пространственно неоднородной сейсмической сети // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Седьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2012. С. 360–364
8. Shulakov D.Y., Verkholtantseva 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. P. 505–510.