

УДК 550.34.001.57

**Верхоланцева Татьяна Викторовна**

младший научный сотрудник,  
Горный институт УрО РАН,  
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А  
e-mail: [tati.verkholantseva@gmail.com](mailto:tati.verkholantseva@gmail.com)

**Дягилев Руслан Андреевич**

кандидат физико-математических наук,  
заведующий лабораторией природной  
и техногенной сейсмичности,  
Горный институт УрО РАН  
e-mail: [dr@mi-perm.ru](mailto:dr@mi-perm.ru)

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ  
ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ  
КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ**

*Аннотация:*

В работе предложена модифицированная математическая модель влияния различных факторов на сейсмичность калийных рудников. Выполнена параметризация модели с помощью геоинформационных технологий для двух факторов: возраста горных выработок и количества отработанных пластов.

*Ключевые слова:* калийный рудник, сейсмологический мониторинг, математическая модель, геоинформационные технологии, параметризация

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.019

**Verkholantzeva Tatyana V.**

junior researcher.  
The Mining Institute UB RAS,  
614007, Perm, 78A Sibirskaya st.  
e-mail: [tati.verkholantseva@gmail.com](mailto:tati.verkholantseva@gmail.com)

**Dyagilev Ruslan A.**

Candidate of physical and mathematic sciences,  
the head of the laboratory  
of natural and man-made seismicity,  
The Mining Institute UB RAS  
e-mail: [dr@mi-perm.ru](mailto:dr@mi-perm.ru)

**GIS TECHNOLOGY APPLICATION  
FOR STUDYING THE INFLUENCE OF  
MINING PARAMETERS ON SEISMICITY  
IN POTASSIUM MINES**

*Abstract:*

The modified mathematical model, describing the influence of different factors on potassium mines seismicity is proposed in the article. The model parameterization is performed using geo-informational technologies for two factors: the age of mine openings and number of mined-out layers.

*Key words:* potassium mine, seismological monitoring, mathematical model, geo-informational technologies, parametrization

*Введение*

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС) – это сложный объект, имеющий высокую техногенную нагрузку и постоянно изменяющуюся геодинамическую обстановку. Интенсивный рост объемов добычи полезных ископаемых приводит к усложнению геомеханических условий подземной разработки месторождений. Так, в последние 30 лет на данной территории произошло несколько техногенных землетрясений, появились провалы, связанные с проседанием грунта и затоплением рудников. После возникновения первого провала 1986 г. на месторождении развернут мониторинг по изучению геомеханического состояния недр. Сейсмологический контроль проводится на месторождении с 1995 г.

За двадцатилетний период сейсмологических наблюдений получен богатый материал о природе сейсмичности, о факторах, влияющих на ее уровень, о пространственно-временных закономерностях. В работе [1] представлена математическая модель, описывающая влияние различных факторов во времени, а также приведены расчеты для трех факторов: волны от удаленных землетрясений, взрывных работ на руднике, возраста горных выработок. Сама математическая модель имеет следующий вид:

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

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.

Как показали расчеты [1, 2], для некоторых факторов масштабный коэффициент  $k$  определить невозможно, так как часто при  $t < t_0$  (до начала действия фактора) сейсмической активности не наблюдается. 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:

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

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 значения  $P_0$  и  $U(t, t_0)$ . Для параметризации модели использовались геоинформационные технологии, которые позволяют картировать и анализировать различные объекты и события, проводить пространственный анализ данных.

#### Методика исследования

Для проведения расчетов зависимости уровня сейсмической активности от горнотехнических параметров был создан проект на основе программного продукта ArcGIS. Проект включает в себя общегеографические данные (рельеф, речная сеть, города и др.), границы рудников, расположение сейсмометров, каталог зарегистрированных сейсмических событий, данные по горнотехническим параметрам отработки месторождения, а также дополнительную информацию по геолого-тектоническому строению ВКМКС.

Для исследования была выбрана территория шахтных полей Первого Соликамского (СКРУ-1) и Второго Соликамского (СКРУ-2) рудников, так как для них есть наиболее полные данные по параметрам отработки. Эта территория, в свою очередь, ограничена с одной стороны регистрационными возможностями сейсмической сети, с другой – границами ведения горных работ. Отчасти данные параметры территориально не перекрываются. Областями, 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 г. (рис. 1).

Для пространственного анализа в качестве параметра, характеризующего сейсмичность, использовались растры плотности выделения сейсмической энергии ES, представляющие собой отношение суммарной выделившейся сейсмической энергии на каком-либо участке к площади этого участка. Данный параметр рассчитывался для временных интервалов продолжительностью один год [3].

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

- конвертирование исходных данных из формата MapInfo в формат Shape-file;
- проверка и исправление геометрии исходных векторных данных;

- проверка и при необходимости исправление ошибок в данных по году отработки, году и типу закладки в соответствии с журналами с параметрами отработанных камер и закладочных работ;
- присвоение ID-номера каждой отдельной камере для определения ее влияния и для подсчета среднего значения плотности выделения сейсмической энергии;

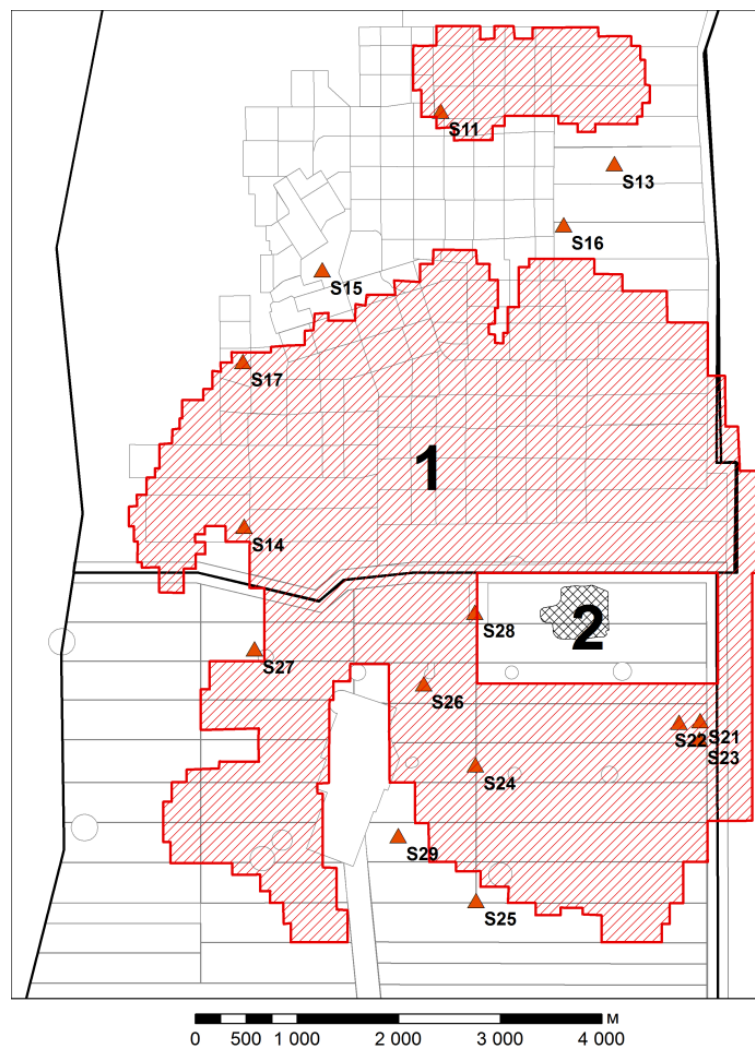


Рис. 1 – Карта с границей области исследования:  
1 – область, выделенная по критерию минимального количества событий;  
2 – область, связанная с землетрясением 1995 г.

Для определения средней плотности сейсмической энергии для каждой отдельной камеры, выделяемой за один год, был использован ГИС-инструмент «*Зональная статистика*». Данный инструмент 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. В качестве зон были выбраны данные по горнотехническим параметрам, в качестве растра значений – непрерывные карты плотности выделения сейсмической энергии. 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.

### Результаты

Схема разработки месторождения, используемая на рудниках ВКМКС, достаточно сложна. Основной особенностью подземного способа разработки ВКМКС является необходимость сохранения водозащитной толщи (ВЗТ – водонепроницаемая пачка пород, расположенная между кровлей верхнего отрабатываемого пласта и подошвой первого снизу водоносного горизонта). Чтобы избежать нарушения ВЗТ, на рудниках применяют камерную систему разработки, при которой вышележащая толща пород поддерживается жесткими ленточными целиками. Параметры камерной системы разработки весьма разнообразны. Ширина камер меняется от 16 м на участках с устойчивыми породами кровли до 3 м на участках со слабоустойчивой кровлей. Высота камер в основном определяется мощностью вынимаемых пластов. Ширина междукамерных целиков, в связи с широким разнообразием горно-геологических и горнотехнических условий, изменяется от 3 до 18 – 20 м.

В настоящее время добыча руды ведется на трех продуктивных пластах (КрII, АБ и В), причем извлекаться может от одного до трех пластов в любых комбинациях. Пласт В в разных частях месторождения может быть представлен как сильвинитом ( $V_c$ ), так и карналлитом ( $V_k$ ). Так, на рудниках существует 11 вариантов разных сочетаний отрабатываемых пластов: однопластовая отработка по пластам (КрII, АБ,  $V_c$  и  $V_k$ ), двухпластовая (КрII+АБ, КрII+ $V_c$ , КрII+ $V_k$ , АБ+ $V_c$  и АБ+ $V_k$ ) и трехпластовая (КрII+АБ+ $V_c$  и КрII+АБ+ $V_k$ ). При отработке нескольких пластов междукамерные целики имеют соосное расположение.

Для уменьшения негативного влияния горного производства на окружающую среду и в качестве дополнительной меры охраны рудников от затопления используется закладка отработанных камер. В качестве закладочного материала используют в основном солевые отходы.

Такое огромное количество различных параметров приводит к тому, что невозможно напрямую сопоставлять все горнотехнические параметры с микросейсмической активностью. 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. Определив характер его влияния, можно перейти к выявлению влияния других, менее значимых.

В работе [2] получены зависимости, описывающие влияние возраста горных выработок с течением времени для рудников СКРУ-1 и СКРУ-2. Данные результаты показали, 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. Для аппроксимации такого неравномерного поведения массива была использована формула, описывающая графики ползучести [2]:

$$\Phi(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{(1 + e^{\rho-\beta \cdot t})}, \quad (2)$$

где  $\Phi(t)$  – функции ползучести;  $\delta, \alpha, \rho, \beta$  – реологические параметры среды.

Результаты аппроксимаций этих зависимостей представлены на рис. 2.

В табл. 1 приведены параметры новой математической модели (2) для данного фактора. Здесь  $(t - t_0)$  – 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.  $P_0$  имеет смысл максимального значения плотности выделения сейсмической энергии.

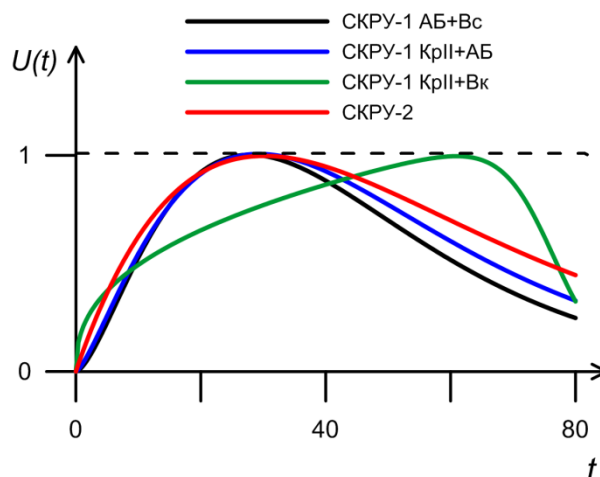


Рис. 2 – Обобщенные графики зависимости плотности выделения сейсмической энергии от возраста горных выработок

Таблица 1

Параметры математической модели для фактора: возраст горных выработок

Рудник	Отрабатываемый пласт	$P_0$ , Дж/100 м <sup>2</sup>	$U(t, t_0)$
СКРУ-1	АБ+В <sub>с</sub>	7,162	$\frac{0,108 \cdot (t - t_0)^{1,585}}{1 + e^{(1,328+0,0598 \cdot (t-t_0))}}$
	КрII+АБ	5,684	$\frac{0,128 \cdot (t - t_0)^{1,37}}{1 + e^{(0,997+0,051 \cdot (t-t_0))}}$
	КрII+В <sub>к</sub>	3,331	$\frac{0,194 \cdot (t - t_0)^{0,405}}{1 + e^{(-17,784+0,233 \cdot (t-t_0))}}$
СКРУ-2	Все пласты	3,686	$\frac{0,246 \cdot (t - t_0)^{0,978}}{1 + e^{(0,628+0,0379 \cdot (t-t_0))}}$

Вторым значимым горнотехническим фактором, влияющим на уровень сейсмической активности, является количество отработанных пластов и их сочетания. В работе [2, 3] представлены расчеты зависимости средней плотности выделения сейсмической энергии от отработки продуктивных пластов. При вычислениях учитывались данные только тех камер, где не было произведено закладки, или данные для периодов времени, когда камеры не были заложены. То есть для расчетов использовались данные, попадающие во временной интервал, начиная с года отработки 1-го пласта, заканчивая датой самой ранней закладки. Для возможности дальнейшего сопоставления данных с разным возрастом выработок в параметры сейсмичности вводилась поправка на возраст выработок, согласно зависимостям в табл. 1. При этом каждое значение параметра сейсмической активности было пересчитано на дату его ожидаемого максимального уровня по формуле:

$$E_{S\ ed} = \frac{E_S(t)}{U(t, t_0)} \text{ при } t > 0, \quad (7)$$

где  $E_{S\ ed}$  – скорректированный параметр сейсмичности;  $E_S(t)$  – значение плотности выделения энергии в выработке возраста  $t$ , полученное инструментом «Зональная статистика»;  $U(t, t_0)$  – значение нормированной зависимости плотности выделения сейсмической энергии от возраста горных выработок в момент времени  $t$ .

Результаты расчетов и осреднения представлены на рис. 3.

Анализ данных графиков показал, что для рудника СКРУ-2 средняя плотность выделения сейсмической энергии в два раза ниже, чем для СКРУ-1. Наименьшим уровнем микросейсмической активности при однопластовой отработке характеризуются выработки по пласту КрII. При двухпластовой отработке наблюдается повышение уровня сейсмической активности в 1,1 – 1,8 раз; при трехпластовой, вопреки ожиданиям, уровень сейсмической активности значительно ниже, чем на участках с одно- и двухпластовой отработкой.

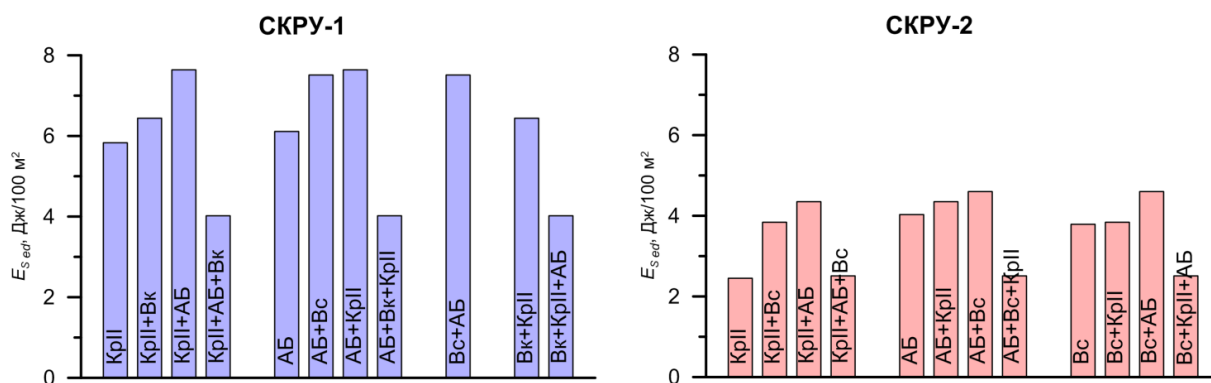


Рис. 3 – Зависимость средней плотности выделения сейсмической энергии от набора обрабатываемых продуктивных пластов

Параметры обновленной математической модели для фактора «количества отработанных пластов» представлены в табл. 2. В данном случае  $P_0$  имеет смысл первоначального значения, то есть значения средней плотности выделения сейсмической энергии при однопластовой отработке.

Таблица 2

**Параметры математической модели для фактора: количество отработанных пластов**

Рудник	Отработка	$P_0$ , Дж/100 м <sup>2</sup>	$U(t, t_0)$
СКРУ-1	двухпластовая	5,97	1,22
	трехпластовая		0,67
СКРУ-2	двухпластовая	3,42	1,29
	трехпластовая		0,76

*Заключение*

Применение геоинформационных технологий позволило определить параметры математической модели, описывающей влияние двух факторов во времени: возраст горных выработок и количество отработанных пластов. Эти результаты показывают, что в калийных рудниках максимум выделившейся сейсмической энергии наступает не сразу после отработки, а через 20 – 60 лет в зависимости от пласта и рудника. После достижения этого времени происходит затухание сейсмического процесса. Изучение влияния количества отработанных пластов показало, что двухпластовая отработка дает заметное

повышение среднего уровня сейсмической активности, тогда как трехпластовая, наоборот, способствует ее понижению. Полученные параметры предложенной модели позволяют прогнозировать негативные явления на новых участках ведения горных работ, идентифицировать проблемные участки и заранее планировать на них превентивные мероприятия.

### Литература

1. Верхованцева Т.В. Параметризация модели влияния различных факторов на сейсмичность калийных рудников / Т.В. Верхованцева, Р.А. Дягилев // Геофизика. - 2015. - № 5. – С. 12 – 18.
2. Верхованцева Т.В. Количественная оценка влияния горнотехнических параметров отработки месторождения на сейсмический режим / Т.В. Верхованцева, Р.А. Дягилев // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16 – 19 июня 2015 г.): материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна – М.: ГЕОС, 2015. – С. 214 – 20.
3. Шулаков Д.Ю. Методика расчета карт плотности выделения сейсмической энергии в условиях пространственно неоднородной сейсмической сети / Д.Ю. Шулаков // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Седьмой междунар. сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 360 – 364.