

3. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемки в горной местности. – Абакан: Таймыркомприродресурсы, 2002. – 187 с.: ил.
4. Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Щербинина Г.П. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе VECTOR // Физика Земли. – 2006. – № 6 – С. 90-96.
5. Пруткин И.Л. О решении трехмерной обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей методом локальных поправок // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1986. – № 1. – С. 67-77.
6. Хесин Б.Э. Рудная геофизика в горных областях. – М.: Недра, 1969. – 200 с.

УДК 550.343.64+622

DOI:10.7242/echo.2023.2.9

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА МИКРОСЕЙСМИЧНОСТИ НА РУДНИКЕ СКРУ-2 ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Т.В. Злобина

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье представлена методика прогнозирования максимально возможного уровня микросейсмической активности на руднике СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийных солей. Разработанный алгоритм включает в себя семь этапов, которые позволяют верифицировать и апробировать математическую модель. Результатом применения данного алгоритма является прогнозная карта на 2023 год для изучаемого рудника. На полученной карте выделены области с параметром $E_{S_{max}}$ (максимальная плотность выделения сейсмической энергии) более 12 Дж/100 м², которые являются геодинамически опасными зонами.

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

Введение

Вопрос прогнозирования сейсмической активности на рудниках и шахтах является актуальным для многих горнопромышленных районов мира [1, 2]. Так, для Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) в работах [3-5] описаны региональный и локальный прогнозы, которые основаны на регистрации сейсмических событий, а также на изучении оседаний земной поверхности. Как показала практика сейсмологических наблюдений на ВКМКС, зарегистрированная сейсмичность зависит от многих факторов. Впервые в работе [6] предложена математическая модель, описывающая влияние различных факторов на уровень техногенной сейсмичности месторождения, а также качественно оценено влияние таких факторов, как разработка нескольких пластов, влияние закладочных работ, возраст горных выработок, влияние удаленных землетрясений и взрывных работ. В статьях [7, 8] показана реализация данной математической модели и даны ее количественные параметры для выбранных влияющих факторов. Публикация [9] демонстрирует апробацию метода прогнозирования сейсмической активности для рудника СКРУ-2 Верхнекамского месторождения. Данный прогноз основан на выявленных ранее закономерностях, которые учитывают влияние нескольких основных горнотехнических факторов. Верификация данной методики была осуществлена только с помощью корреляционного анализа. Настоящая работа описывает сам алгоритм прогнозирования сейсмической активности, который включает не только корреляционный, но и регрессионный анализ. Предложенная методика описана для рудника Второго Соликамского рудоуправления – СКРУ-2.

Особенности микросейсмической активности на руднике СКРУ-2

Шахтное поле рудника СКРУ-2, приуроченное к южной части Соликамской брахиантиклинали (южная часть Соликамского участка), имеет размер 7.0 на 8.5 км. Площадь шахтного поля по границам горного отвода составляет 50.4 км². На руднике ведется добыча силвинитовой руды на пластах АБ, Вс, и Красный-II [10].

Промышленная отработка данного участка началась в 1974 году. 5 января 1995 года в северо-восточной части рудника произошло динамическое разрушение несущих элементов горных выработок, что привело к техногенному землетрясению с магнитудой $m_b = 4.7$. На земной поверхности непосредственно над участками обрушения образовалась мульда с размерами в плане 650 на 850 м при глубине 4.5 м [11]. Несмотря на обширное разрушение и появление оседания земной поверхности рудник продолжил функционировать. 18 ноября 2014 года в юго-восточной части ранее образовавшейся мульды произошел провал [12]. В настоящее время рудник находится в стадии ликвидации.

Особенности вскрытия пластов, способа подготовки и раскройки шахтного поля представлены в работе [13]. Первые сейсмологические наблюдения на данном шахтном поле были получены в 1995 году. В настоящее время в самом руднике установлено 10 сеймопавильонов, оснащенных вертикальными сеймоприемниками СМЗ-КВ, позволяющими регистрировать сейсмические сигналы в диапазоне частот от 0.5 до 100 Гц. Посредством кабельных телеметрических линий связи сеймоприемники связаны с наземными регистрирующими модулями, которые в непрерывном режиме принимают сигналы сеймоприемников и фиксируют сейсмические события [14-15]. С 2000 по ноябрь 2022 года сейсмологической сетью на руднике зарегистрировано более 6000 сейсмических событий, связанных с деформационными процессами в подработанном массиве горных пород. Суммарная энергия сейсмических событий, произошедших на территории рудника, составила 4.5 МДж.

Этапы прогнозирования микросейсмической активности

После проведения ряда исследований [6-9] по изучению различных влияющих факторов на интенсивность сейсмичности в калийных рудниках был сформулирован алгоритм прогнозирования микросейсмической активности. Последовательность этапов представлена на рисунке 1.

Первый этап данного алгоритма заключается в выделение факторов, влияющих на уровень микросейсмической активности. Более подробно об изучении влияющих факторов в исследовании [7].

Второй этап сводится к выбору прогнозируемого сейсмического параметра. В данном случае была выбрана величина плотности выделения сейсмической энергии – E_s . Методика расчета данных карт представлена в статье [16]. Расчет параметров математической модели влияющих факторов осуществляется при третьем этапе. Актуализированные значения модели для рудника СКРУ-2 по данным 2000-2020 гг. описаны в [8]. Далее (четвертый этап) необходимо выбрать те факторы, которые целесообразно использовать при прогнозе. Подробно изучение возможности использования изученных факторов в прогнозировании отражено в работе [9].

Более подробно в настоящей статье пойдет речь об пятом, шестом и седьмом этапах прогнозирования. Пятый шаг описываемой методики заключается в расчете прогнозируемого параметра для определенного года по следующей формуле:

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

где $P(t)$ – прогнозируемое значение плотности выделения сейсмической энергии, рассчитанное для определенного года (Дж/100 м²); P_0 – максимальный уровень сейсмичности, а именно плотности выделения сейсмической энергии для фактора возраста горных выработок (Дж/100 м²); $U_i(t, t_i)$ – функция, описывающая относительные изменения влияния выбранных факторов во времени; t – момент времени, для которого рассчитывается модельное значение; t_i – момент начала действия фактора.

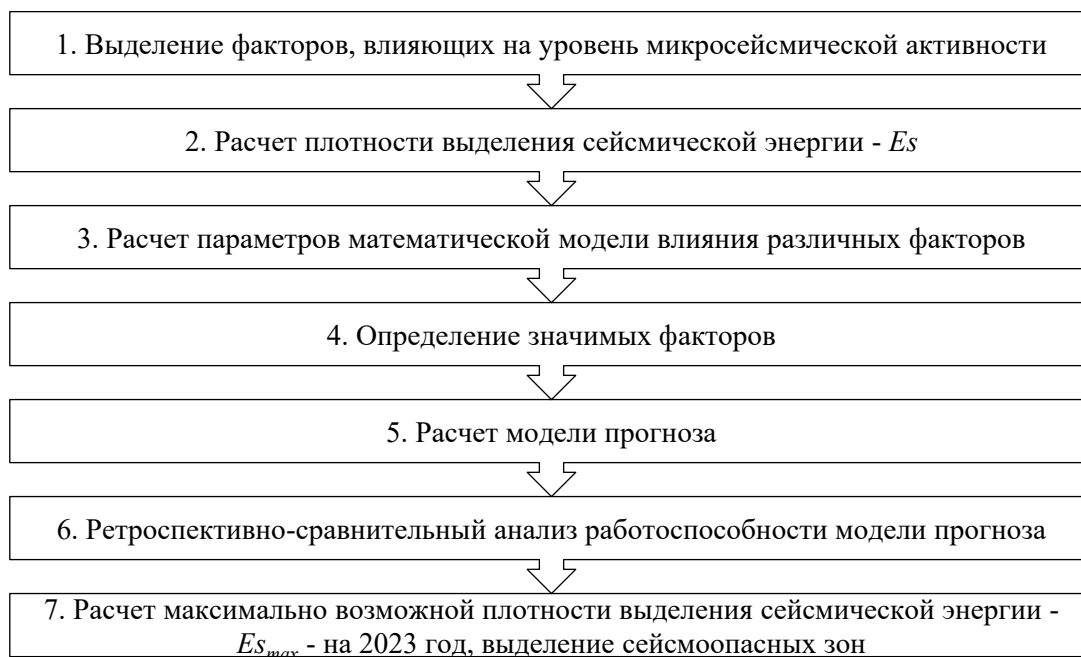


Рис. 1. Алгоритм прогнозирования плотности выделения сейсмической энергии

В текущем алгоритме используются два основных влияющих горнотехнических фактора: возраст горных выработок и тип и возраст закладочных работ. Параметр $P(t)$ рассчитывается для каждой отдельной камеры на основании характеристик, полученных из базы данных по параметрам отработки. Все расчеты проводились в программном пакете ArcGIS.

Ретроспективно-сравнительный анализ работоспособности модели будет являться шестым этапом данного алгоритма. Этот этап необходим для установления, насколько верно модельные вычисления отражают фактический исходный материал.

В качестве исходных данных были взяты полигональные слои отработанных камер по трем продуктивным пластам рудника СКРУ-2. Все эти слои объединялись в один, при этом каждый полигон-камера наделялся соответствующей атрибутивной информацией: идентификатор, площадь, количество пластов, минимальный год отработки, минимальный год закладки. По этим данным проводился расчет прогнозного параметра по формуле (1). Для сопоставления площадных данных были построены растры модельных значений E_s методом интерполяции кригинг. Далее были получены коэффициенты корреляции Пирсона между фактическими и модельными данными (сопоставление данных проводилась для каждой отдельной ячейки растра). Пример таких карт параметра E_s для 2019 год представлен на ри-

сунке 2. Исследуемая площадь камер для выбранного года составляет 8.9% от общей площади. Коэффициент корреляции составил 0.30. Рассматривая рис. 2а и 2в, можно отметить совпадение реальных и прогнозных зон с повышенными значениями плотности выделения сейсмической энергии (северо-запад и юго-восток изучаемой территории). Центральная часть характеризуется пониженными значениями прогностического параметра. К зарегистрированному и рассчитанному полям применялся сглаживающий фильтр с радиусом осреднения 750 метров (рис. 2б и 2г). При применении сглаживания коэффициент корреляции увеличился до 0.58, что говорит о заметной корреляционной связи.

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 рисунке 3а представлен график зависимости зарегистрированной сейсмичности от модельных значений. Рассматривая его, необходимо выделить определенную тенденцию: с увеличения 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.

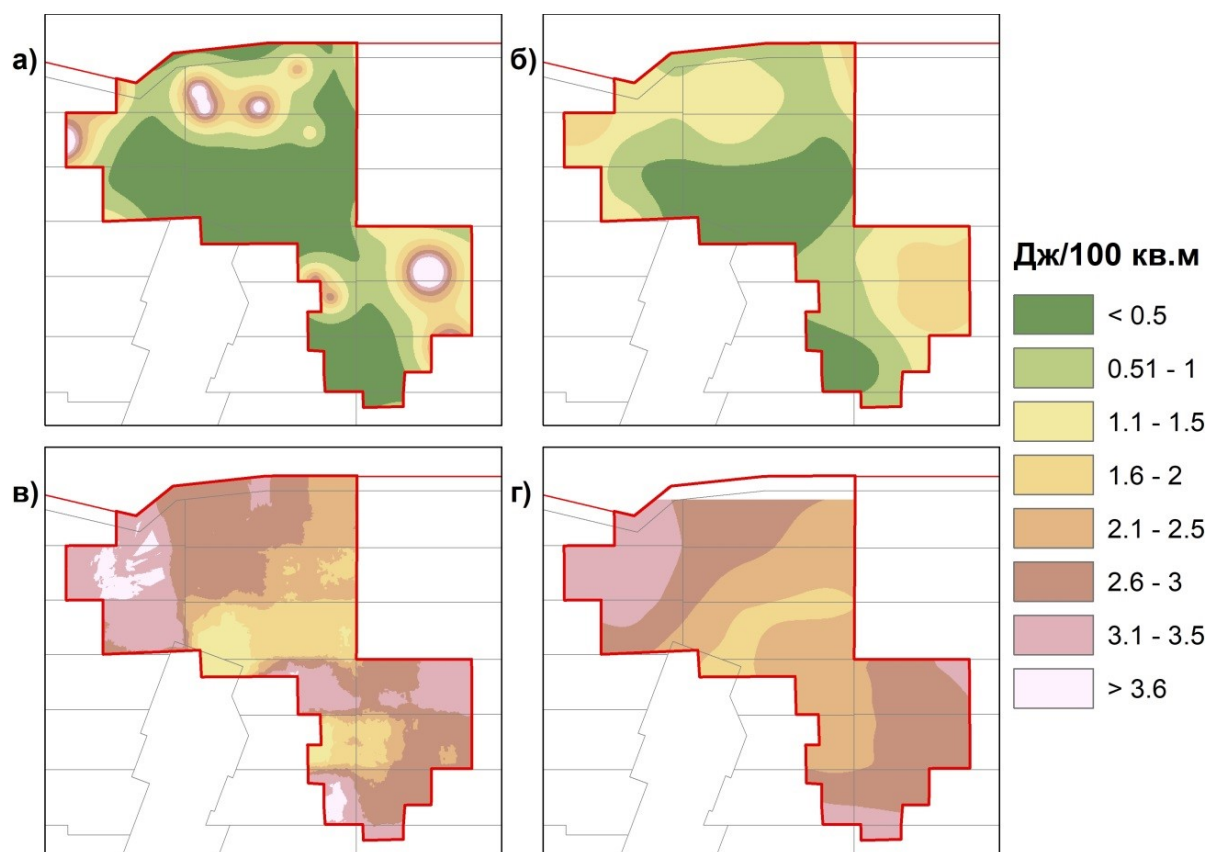


Рис. 2. Карты плотности выделения сейсмической энергии для СКРУ-2 на 2019 год:
а) фактическая карта E_s ; б) отфильтрованная фактическая карта E_s с радиусом сглаживания 750 м;
в) модельная карта E_s ; г) отфильтрованная модельная карта E_s с радиусом сглаживания 750 м

Рисунок 4а демонстрирует графики невязок регрессии, который показывает распределение пере- и недооценок по отношению к прогнозированным значениям. В идеальном случае данные значения должны распределяться случайно. Как видно

из рисунка 4а, значения распределены неравномерно, есть смещения в положительные значения (положительная асимметрия). Это говорит о наличии нелинейной связи между параметрами; для устранения данного смещения данные были прологарифмированы. Зависимость логарифма зарегистрированных значений E_s от логарифма рассчитанных показана на рисунке 3б. Рисунок 4б 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. Как видно из рисунка 4б, одному и тому же значению модельного параметра могут соответствовать 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:

$$\ln(E_{s_{max}}) = 2.05 \cdot \ln(P(t)) \quad (2)$$

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

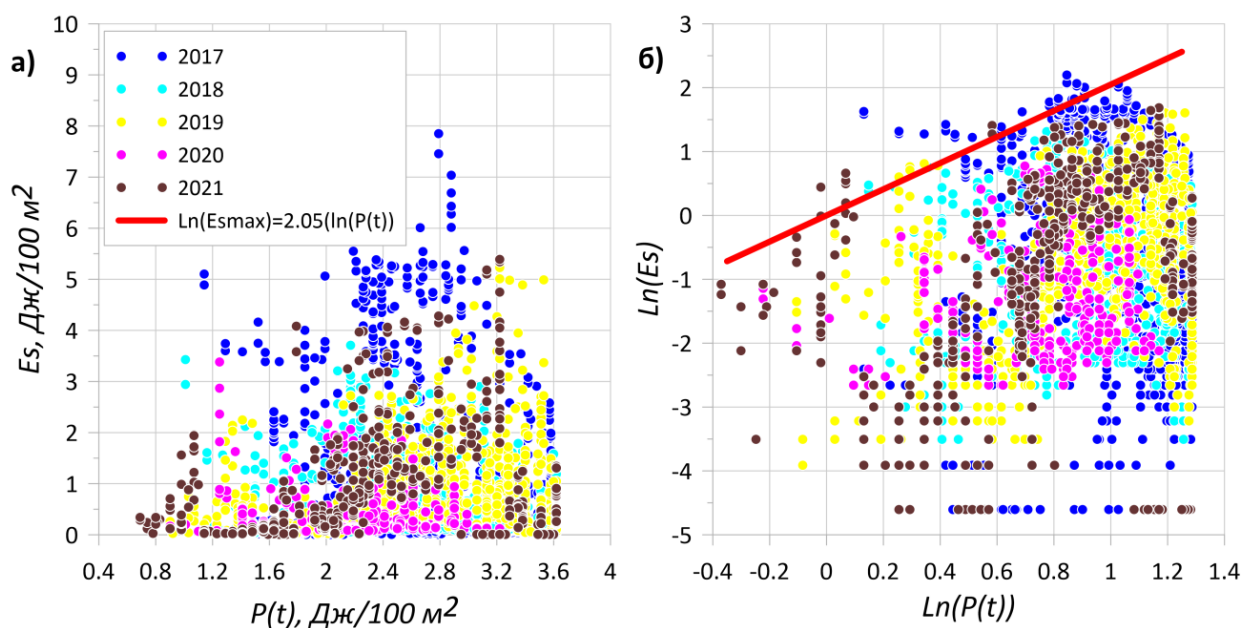


Рис. 3. а) Зависимость зарегистрированной плотности выделения сейсмической энергии от рассчитанного значения для СКРУ-2; б) зависимость логарифма зарегистрированной плотности выделения сейсмической энергии от логарифма рассчитанного значения для СКРУ-2

Последним завершающим седьмым этапом алгоритма прогноза является расчет прогностического сейсмического параметра – ожидаемого максимального уровня плотности выделения сейсмической энергии на 2023 год. На рисунке 5 показаны рассчитанные карты модельного параметра $E_{s_{max}}$ без сглаживания и со сглаживанием значений поля в радиусе 750 м. Зоны с пониженными значениями прогностического параметра были выделены по условию $E_{s_{max}} < 3$ Дж/100 м². Возраст таких камер составил 35-50 лет, из них в 92% камер была произведена закладка хотя бы на одном продуктивном пласте. Геодинамически опасные зоны выделялись на территории, где прогностический

параметр $E_{s_{max}}$ более 12 Дж/100 м². Данная зона проходит вдоль всего рудника в центральной части с юго-запада на северо-восток. Рассматривая эту территорию совместно с планами горных работ, можно сказать, что камеры, на которых ожидается повышенные значения $E_{s_{max}}$, имеют возраст 10-30 лет. 16% этих камер не заложены на всех трех обрабатываемых пластах.

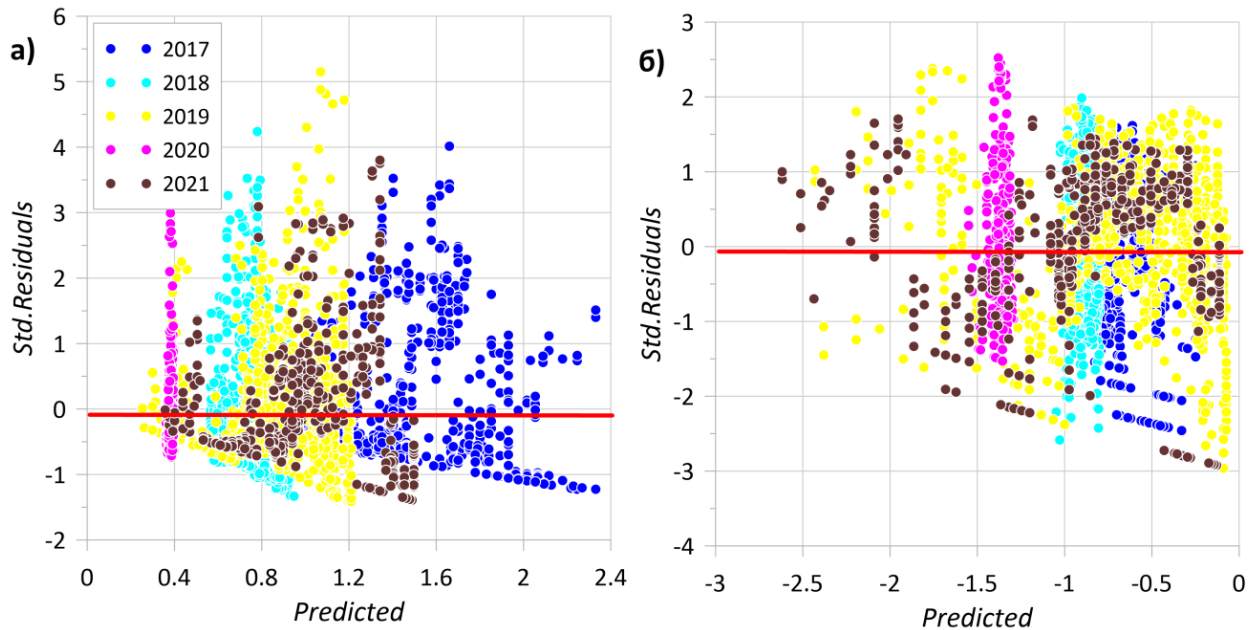


Рис. 4. а) Зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений для СКПУ-2; б) зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений для логарифмированных данных для СКПУ-2

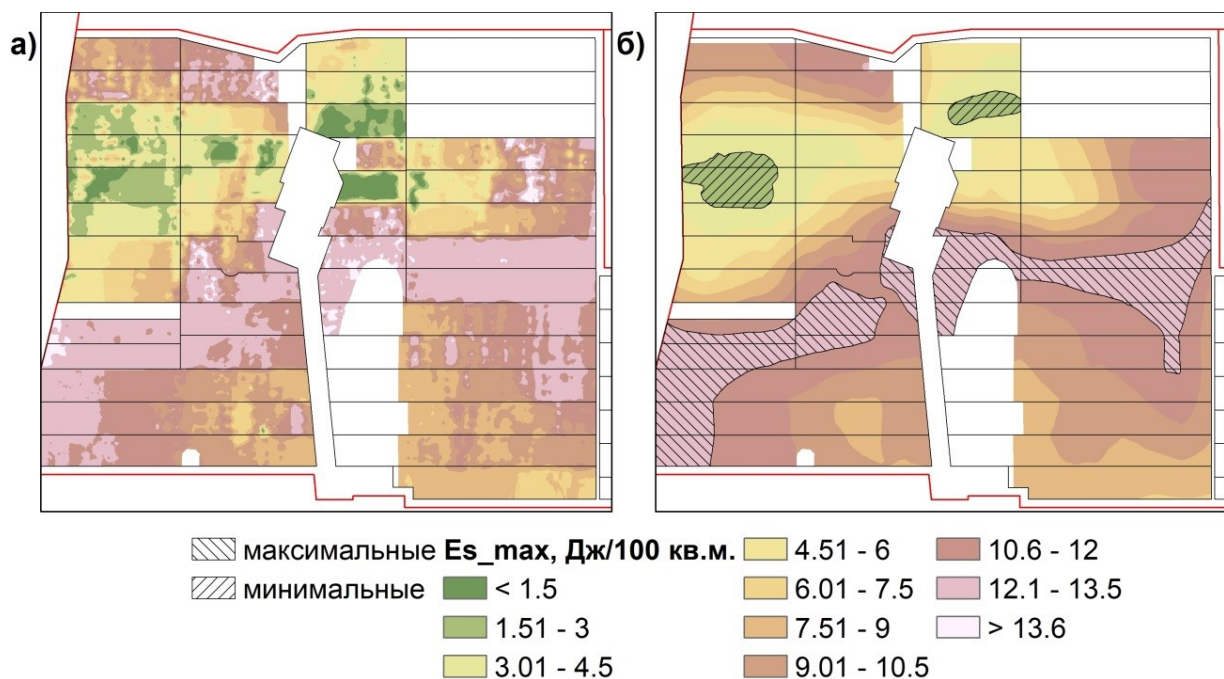


Рис. 5. Карты максимальных значений плотности выделения сейсмической энергии для СКПУ-2 на 2023 год:
а) модельная карта $E_{s_{max}}$;
б) модельная отфильтрованная карта $E_{s_{max}}$ с радиусом сглаживания 750 м

Выводы

Предложенный в статье алгоритм показал возможность прогноза максимального уровня плотности выделения сейсмической энергии на исследуемом руднике на всей отработанной площади. Количественная оценка влияния двух горно-технических факторов (возраст горных выработок, а также тип и возраст закладочных работ) позволила выделить область с повышенным прогностическим параметром Es_{max} . Эта территория является геодинамически опасной, на ней возможны крупные сейсмические события в следующем году. На данной территории рекомендуется предусмотреть соответствующие меры для снижения рисков возникновения аварийных ситуаций.

*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. Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 99-109.
2. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 2. – С. 34-47.
3. Дягилев Р.А. Прогнозирование крупных сейсмических событий по результатам мониторинга на руднике СКРУ-2 // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. конф. / ПГУ. – Пермь, 1997. – С. 188-189.
4. Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю. Методы регионального и локального сейсмологического прогноза на калийных рудниках // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тез. докл. I-го междунар. шк.-семинара. – Красноярск, 2001. – С.58-59.
5. Шулаков Д.Ю. Изучение корреляционной зависимости между микросейсмической активностью и сдвигами земной поверхности в зависимости от горно-технологических условий // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. – Пермь, 2004. – С. 104-106.
6. Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Верхоланцев А.В. Техногенная сейсмичность калийных месторождений // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию Горн. ин-та УрО РАН и 75-летию основателя и первого директора ин-та чл.-корр. РАН А.Е. Красноштейна / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 45-50.
7. Дягилев Р.А., Злобина Т.В., Шулаков Д.Ю. Техногенная сейсмичность в калийных рудниках Верхнекамского месторождения. // 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, 2018. – С. 80-94.
8. Злобина Т.В. Обновление параметров модели прогноза сейсмической активности для рудника СКРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей // Горное эхо. – 2022. – № 1 (86). – С. 101-108. – DOI: 10.7242/echo.2022.1.16.
9. Злобина Т.В., Дягилев Р.А. Апробация метода прогноза сейсмической активности для Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 4. – С. 56-66. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_56.
10. Белкин В.В. Мониторинг геологической среды Верхнекамского соленосного бассейна / ПГТУ, Березников. филиал. – 2-е изд. – Березники, 2006. – 252 с.
11. Маловичко Д.А. Изучение механизма Соликамского землетрясения 5 января 1995 года // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, №1 – С. 75-90.
12. Шулаков, Д.Ю., Варлашова Ю.В. Сейсмологический мониторинг развития аварийной ситуации на руднике СКРУ-2 // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Десятой Междунар. сейсмологич. шк. / ГС РАН. – Обнинск, 2015. – С. 368-372.
13. Соловьев В.А., Секунцов А.И. Разработка калийных месторождений: практикум. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 265 с.
14. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 25-29.

15. 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.
16. Шулаков Д.Ю. Методика расчета карт плотности выделения сейсмической энергии в условиях пространственно неоднородной сейсмической сети // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 7-й Междунар. сейсмолог. шк. / ГС РАН [и др.]. – Обнинск, 2012. – С. 360-364.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2023.2.10

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙМОСТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙМОРАЗВЕДКИ

А.И. Никифорова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрена связь физических характеристик геологического разреза и особенностей эвапоритонакопления. Выполнен сеймостратиграфический анализ малоглубинных сейморазведочных исследований. Намечены наиболее проблемные участки с точки зрения безопасности ведения горных работ.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей, малоглубинная сейморазведка, сейсмофация, высокоамплитудная складка.

Неоднородность физико-геологических условий эвапоритонакопления и разнонаправленный характер постседиментационных изменений обуславливают заметные различия акустических свойств соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). Отмечается связь физических характеристик геологического разреза с особенностями геологического развития территории. Это проявляется в изменчивости параметров сейсмической записи: амплитудной выразительности и протяженности отражений, частотного состава, рисунка осей синфазности в пакетах отражений. Анализ перечисленных характеристик в качестве индикаторов геологических процессов (тектонических, палеогеоморфологических и т.д.) лежит в основе сеймостратиграфического анализа [1].

При детальном малоглубинном сейморазведочном исследовании единицей изучения на этапе интерпретации является сейсмическая фация. В данном случае под термином «сейсмофация» понимается генетическая группа отложений, строение которых отображается в наборе параметров сейсмозаписи.

В условиях ВКМКС особый интерес с позиций обеспечения безопасного ведения горных работ представляет прогноз сейсмофаций интенсивных постседиментационных преобразований продуктивной толщи, в том числе высокоамплитудных складок.

Сеймостратиграфическую интерпретацию малоглубинных сейсмических данных можно разделить на два основных этапа. На первом этапе выполняется преобразование априорной геолого-геофизической информации в форму, приемлемую для сопоставления с результатами сейморазведочных исследований. На втором проводится совместный структурный и сейсмофациальный анализ, результатом которого являются интерпретационные заключения о природе выделенных сейсмофаций и прогноз их распространения.

Данная методика опробована в южной части ВКМКС, где в 2008-22 гг. выполнялись малоглубинные сейморазведочные исследования. В качестве исходных данных использовались: