

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ НЕДР

А. Н. Шабаров¹, Э. В. Смирнов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,
199106, Россия, post@spmi.ru

² ПАО «УралКалий», Пермский край, г. Березники, 618426, Россия

Аннотация: Развитие горнодобывающих предприятий в настоящее время сталкивается с негативными трендами, обусловленными геодинамическими и геомеханическими условиями отработки. Большинство негативных факторов, влияющих на безопасность отработки, так или иначе связаны со структурными нарушениями массива различных рангов. В используемых на горнодобывающих предприятиях регламентирующих документах не представлена методология учета структурных нарушений на крупных масштабных уровнях (тектонические разломы), позволяющая оценить формирование тектонически нагруженных и разгруженных зон, обусловленных блочным строением массива. В статье описан опыт Научного центра геомеханики и проблем горного производства, демонстрирующий необходимость учета структурных нарушений при планировании горных работ в условиях не только прочных хрупких рудных месторождений, но также и соляных месторождений, для которых характерно отсутствие выраженных разломов непосредственно в соляной толще. Представлен комплексный подход к выявлению геодинамически опасных зон и прогнозу опасных геодинамических процессов для соляных месторождений. Сделан вывод о том, что зоны главным образом приурочены к зонам влияния тектонических нарушений во вмещающем массиве, а их потенциальная опасность определяется неотектонической активностью, морфологией сместителя, а также направлением деформаций пород при смещении. Предложена последовательность исследований и перспективные направления работ, которые могут положительно сказаться на достоверности получаемых результатов при прогнозе геодинамически опасных зон и проведении геодинамического районирования в условиях соляных месторождений.

Ключевые слова: геодинамическое районирование, напряжённно-деформированное состояние, тектонические нарушения, соляные месторождения, численное моделирование, геодинамически опасные зоны, комплексный подход, геодинамические явления, блочная структура месторождения.

Для цитирования: Шабаров А.Н., Смирнов Э.В. Методические принципы прогноза опасных природных процессов на основе геодинамического районирования недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 157–170. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_157.

Methodological framework of forecasting hazardous natural processes based on geodynamic zoning

A. N. Shabarov¹, E. V. Smirnov²

¹ Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia, post@spmi.ru

² Uralkali, Perm Krai, Berezniki, 618426, Russia

Abstract: The development of mining enterprises is currently facing negative trends due to geodynamic and geomechanical mining conditions. Most of the negative factors affecting the safety of mining are somehow related to structural failures of the host rock mass. The regulatory documents used at mining enterprises do not provide a methodology for accounting for structural failures at large scale levels (tectonic faults), which allows us to assess the formation of tectonically loaded and unloaded zones due to the block structure of the host rock mass. The article describes the experience of the Scientific Center for Geomechanics and Mining Issues, demonstrating the need to consider structural failures in mining operations planning not only in conditions of hard brittle ore deposits, but also salt deposits, which are characterized by the absence of tectonic faults directly in the salt layer. The article presents a comprehensive approach to the identification of geodynamically hazardous zones and the prediction of dangerous geodynamic processes for salt deposits. It is concluded that the zones are mainly confined to the areas of influence of tectonic faults in the host rock mass, and their potential danger is determined by neotectonic activity, the morphology of the fault plane, as well as the direction of rock deformations during displacement. Advanced research directions are proposed that can positively affect the reliability of the results obtained in predicting geodynamically hazardous zones and conducting geodynamic zoning in salt deposits conditions.

Key words: geodynamic zoning, stress-strain state, tectonic faults, salt deposits, numerical modeling, geodynamic hazardous zones, integrated approach, geodynamic phenomena, block structure of the deposit.

For citation: Shabarov A. N., Smirnov E. V. Methodological framework of forecasting hazardous natural processes based on geodynamic zoning. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):157–170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_157.

Введение

Развитие горнодобывающего предприятия невозможно без постоянного развития производства — вскрытия новых горизонтов и углубления горных работ, вовлечения в разработку месторождений, эксплуатация которых ограничивалась существовавшими технологиями. Применение новых технологий и постоянное усложнение условий требует проведения комплекса изысканий перед созданием проекта и должно быть экономически обосновано.

Сдерживающим фактором стремительного и безопасного развития горнодобывающих предприятий являются

геомеханические проблемы при разработке месторождений [1, 2], связанные с тем, что массив горных пород представляет собой сложную иерархически блочную анизотропную среду, характеризующуюся неравнокомпонентным гравитационно-тектоническим полем напряжений, сложными гидрогеологическими условиями [3, 4], реологическими свойствами, низкой устойчивостью или, наоборот, высокими упругими свойствами и хрупким характером разрушения.

Данный фактор представляет собой широкий спектр рисков безопасности при ведении горных работ



Рис. 1. Диаграмма геомеханических факторов, усложняющих условия отработки месторождений

Fig. 1. Diagram of geomechanical factors leading to mining conditions complicating

[4–6] и характерен для всех типов рудных и нерудных месторождений. На рис. 1 геомеханические проблемы представлены последовательно, в соответствии с увеличением их масштаба.

Более половины указанных на рис. 1 факторов (выделены зеленым цветом) так или иначе связаны со структурными нарушениями массива различного масштаба. Как показывает анализ исследований и данных наблюдений, на зоны разломов и зоны их влияния приходятся эпицентры и гипоцентры большинства природных землетрясений и горно-тектонических ударов (техногенных землетрясений), более двух третей горных ударов и внезапных выбросов угля и газа в шахтах, нарушения линейных объектов на поверхности и оползни. Структурные нарушения высоких рангов [7, 8] обуславливают блочное строение массива с различным напряженно-деформированным состоянием отдельных геодинамических блоков и их свойствами. Таким образом, выделение активных разломов, реконструкция блочной структуры массива и контроль состояния массива при развитии горных работ являются основой для обеспечения геодинамической безопасности.

Влияние негативных геомеханических факторов может быть снижено за счет внедрения комплексного геомеханического сопровождения, включающего изучение свойств пород и тектонических разломов, геодинамическое районирование, натурные и математические исследования процессов, происходящих в массиве [9, 10]. Результаты в виде методик и методологий определения геомеханически безопасных параметров отработки должны быть интегрированы в производство, в том числе в виде цифровых инструментов проектирования и оптимизации производства. Разработка комплексной методологии ведется Научным центром геомеханики и проблем горного производства в рамках выполнения работ по научному сопровождению с крупными заказчиками, такими как ПАО «УралКалий».

Геодинамическое районирование является первым и основополагающим шагом геомеханического сопровождения разработки полезных ископаемых и должно выполняться еще на стадии предпроектных изысканий [11]. На сегодняшний день регламентирующие документы горнодобывающих предприятий не предусматривают четких инструкций по геодинамическому

районированию и в целом по применению комплексного подхода к прогнозу процессов, протекающих в массиве при развитии горных работ. В работе выполнено обобщение существующих методологических подходов от первичного выделения структурных нарушений до локализации геодинамически опасных зон.

Существующие и перспективные подходы к геодинамическому районированию

Выявление и прогноз геодинамически опасных зон в массиве на участке ведения работ, являющиеся результатом геодинамического районирования, в перспективе способствует повышению безопасности работ и исключению динамических проявлений горного давления [12, 13].

Массив горных пород представляет собой иерархически блочную среду, механическое поведение которой определяется всеми уровнями структурной нарушенности, от крупных линейментов и региональных разломов, систем трещин в масштабах горной выработки и вплоть до уровня микротрещин в кристаллической решётке минералов. Применительно к месторождениям солей тектоническая структура территории может оказать значительное влияние на состояние соляной залежи [14, 15], хотя в солях нарушения имеют невыраженный характер. В рамках геодинамического районирования необходимо с достаточной степенью достоверности определить и ранжировать тектонические нарушения, выступающие границами крупных геодинамических блоков.

Для этого необходимы сведения о геометрии, кинематике и характере взаимодействия блоков. В геологической практике основными способами обнаружения разрывных нарушений являются структурные построения,

основанные на данных бурения и площадных геофизических исследованиях. Недостаточная густота сети скважин зачастую не позволяет разделить формирующиеся дизъюнктивные и пликативные нарушения, а также определить с приемлемой точностью положение разлома на интервале между скважинами. Таким образом, применение подобных методов недостаточно для обнаружения потенциально опасных зон, связанных с нарушениями.

Перспективным является использование ряда методов — морфометрического и линейментного анализа, геофизических, геохимических, геоморфологических и других методов — для построения актуальной блочной структуры и оценки активности существующих нарушений. Морфометрия дает возможность выявить ранее неизвестные структуры по геоморфологическим признакам. Пример выполнения морфоструктурного анализа для Верхнекамского месторождения солей (ВКМКС) с определением зон потенциального влияния разломов представлен на рис. 2.

Под зонами влияния на рис. 2 подразумеваются зоны вблизи нарушений в подстилающей и вышележащей толщах пород, представляющих собой участки дробления, слабоустойчивые и сильнотрещиноватые. В зонах влияния нарушений наблюдается изменение напряженно-деформированного состояния, особенно неблагоприятными являются участки пересечения нескольких нарушений [16–18].

Расчет ширины зоны влияния тектонических нарушений выполнен по эмпирической формуле (1), предложенной Г. Г. Кочаряном [19]. Данная формула получена в результате статистической обработки результатов натурных наблюдений и данных сейсмического мониторинга приразломной

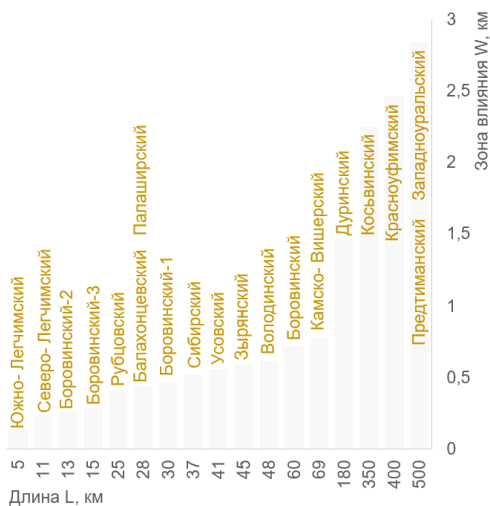
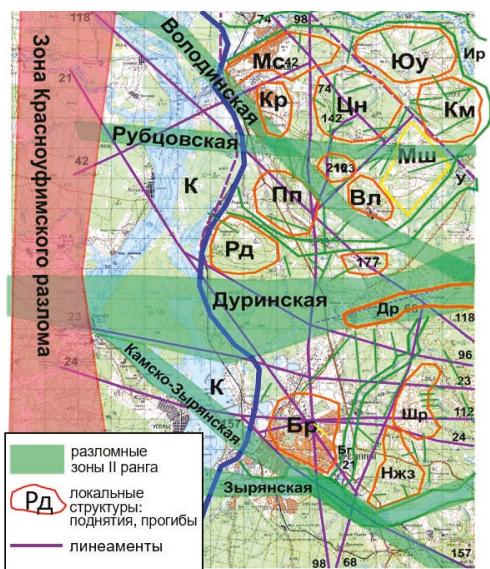


Рис. 2. Схема разломов, установленных методом морфоструктурного анализа в районе рудников по карте масштаба 1:100 000 с зонами их влияния (а) и диаграмма расчетных зон влияния по Г. Г. Кочаряну [19] (б) для Соликамско-Березниковской части ВКМКС
 Fig. 2. A diagram of faults established by morphostructural analysis on a 1:100,000 scale map with their influence zones (a) and a diagram of calculated influence zones according to G. G. Kocharyan [19] (b) for the Solikamsk-Berezniki part of the VKMKS

зоны с использованием высокоточного оборудования. Величины расчетных зон, полученные по данной зависимости, представлены на рис. 2, б.

$$W = 0,05 \cdot L^{0,65} \quad (1)$$

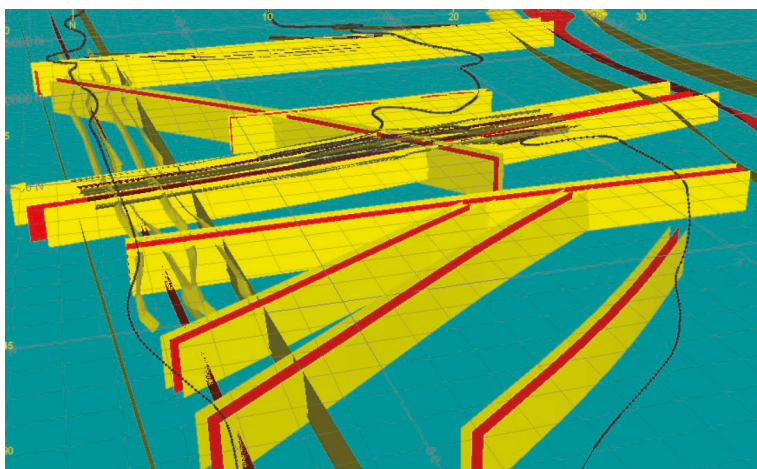
где L — длина нарушения.

Особенностью методики геодинамического районирования является выявление не отдельных, независимых и хаотично распределённых линеаментов и разломов, а свойственных изучаемому региону закономерно упорядоченных и ранжированных систем разломов, отражающих генетически единое и иерархически организованное распределение полей напряжений и отображающихся в деформациях фундамента и горизонтов осадочного чехла.

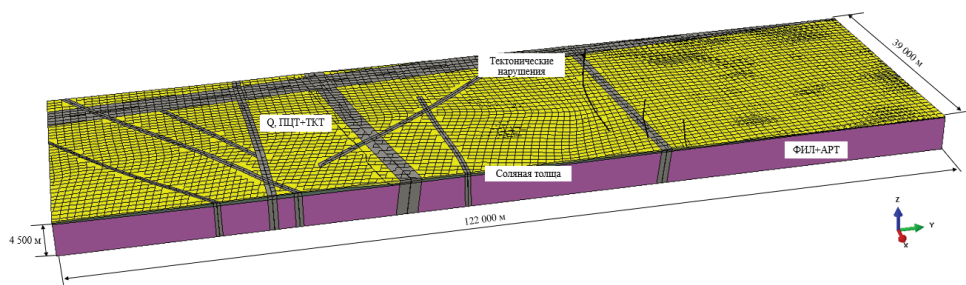
Полученные комплексом методов результаты могут быть использованы для построения пространственных твердотельных моделей с учетом всех нарушений в специализированных программных комплексах (рис. 3) [20, 21].

Нарушения, в зависимости от своего типа и генезиса, оказывают различное по природе негативное влияние на ведение горных работ. Так, глубинные разломы и разрывы чаще всего рассматриваются в качестве сейсмогенерирующих структур, нарушения более низкого ранга и трещины могут стать причинами деформаций и нарушения эксплуатации подземных сооружений.

Для дальнейшей оценки важнейшими параметрами являются мощность, геометрия нарушения и его



а



б

Рис. 3. Построение пространственных каркасов структурных нарушений с учетом зон их влияния (а) и численной пространственной модели (б)

Fig. 3. Spatial frameworks of faults considering their zones influence (a) and a numerical spatial model (b)

свойства (обусловленные, в большинстве случаев, генезисом).

Получить наиболее достоверные результаты геодинамического районирования позволяет использование последовательности моделирования, представленной на рис. 4.

Данная последовательность включает в себя этапы для достоверной оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности нарушений: на первом этапе отстраиваются каркасы нарушений с учетом изменения их геометрии, в том числе по глубине, мощности, и зон влияния, в которых

породы предположительно находятся в измененном состоянии. Данные о структурных нарушениях увязываются с данными о литотипах в пределах рассматриваемой области — рудных залежей и вмещающих пород. Далее каждому участку массива по результатам предварительных геологических изысканий назначаются физико-механические свойства; свойства должны уточняться по мере развития горных работ и проведения более детальных исследований, однако для задач геодинамического районирования достаточно усредненных свойств.

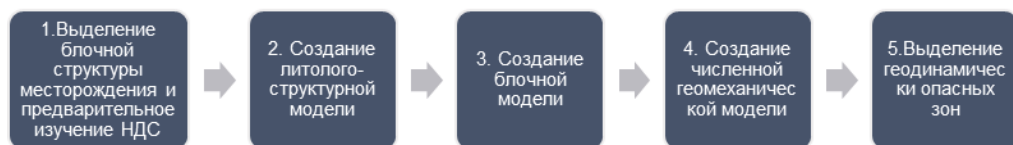


Рис. 4. Последовательность моделирования для обеспечения достоверного прогноза геодинамической ситуации

Fig. 4. The sequence of modelling to ensure a reliable forecast of the geodynamic situation

Результаты. Прогноз геодинамически опасных зон

На основании сведения всех полученных данных в численную модель выполняется моделирование и оценивается распределение напряжений и деформаций в пределах интересующих отметок, что позволяет выделить геодинамически опасные зоны, нежелательные для ведения горных работ без выполнения специальных мероприятий. Численная модель учитывает структурные нарушения высоких рангов и их влияние на напряженно-деформированное состояние геодинамических блоков. В данном случае определяется естественное напряженно-деформированное состояние массива до начала ведения горных работ.

Тектонически напряженные зоны главным образом приурочены к зонам влияния тектонических нарушений, их потенциальная опасность определяется неотектонической активностью, морфологией и строением сместителя разрыва, а также направлением деформации пород при смещении. На рис. 5 представлена схема с выделенными тектоническими нарушениями и проявившимися крупнейшими сейсмическими событиями по данным научных источников [22–24] для Верхнекамского месторождения.

Существуют два основных типа тектонически напряженных зон, связанных с нарушениями, различающихся по геологическим признакам и естественному напряженному состоянию:

- зоны I типа характерны для разломов, представляющих собой плотно сомкнутую трещину, окруженную областью с малым количеством приразрывных трещин; характеризуются высоким уровнем тектонических напряжений, увеличенными значениями прочностных характеристик и модулей деформации пород;

- зоны II типа отделены от сместителя нарушенным и разгруженным участком; для них характерны существенно меньшие напряжения и изменения состояния и свойств пород, чем в зонах I типа [14].

Численное моделирование позволяет оценить распределение напряжений в окрестности структурного нарушения и в геодинамических блоках в зависимости от его типа. Разломы высоких рангов преимущественно являются зонами дезинтеграции, способствуя разгрузке напряжений и формированию повышенных деформаций. Это справедливо и для месторождений солей, где нарушения прослеживаются в вышележащей и нижележащей толщах, но их влияние на продуктивный пласт также может быть оценено исходя из блочного строения вмещающего массива с учетом реологических свойств солей. Это хорошо видно на рис. 6, представляющем собой эпюру распределения напряжений для соляного пласта в Соликамско-Березниковской части ВКМКС. На эпюре видно, что в соседних геодинамиче-

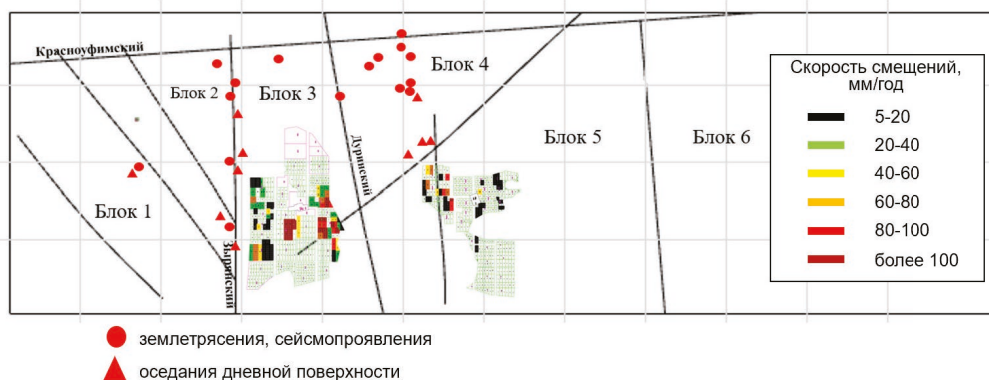


Рис. 5. Структурная карта Соликамско-Березниковской части ВКМКС с тектоническими нарушениями, эпицентрами динамических событий и данными маркшейдерских наблюдений по рудникам

Fig. 5. Structural map of the Solikamsk-Berezniki part of the Verkhnekamskoye salt deposit with tectonic disturbances, epicenters of dynamic events and mine surveying data

ских блоках формируется различный уровень напряжений, наблюдаются зоны локальной концентрации напряжений в местах пересечения нарушений. Данные, полученные в результате численного моделирования, сопоставлены с данными натуральных маркшейдерских наблюдений, представленных на рис. 5 в виде закрашенных прямоугольников. Черным и бордовым цветом обозначены места с наибольшими деформациями стенок камер. Расположение указанных мест совпадает с местами измененного напряженного состояния, полученными на основании численного моделирования. В блоке 5 также наблюдаются в целом большие величины деформирования, что предположительно может быть связано с расположением в более нагруженном геодинамическом блоке.

Подобные выводы могут быть сделаны лишь с помощью проведения крупномасштабного численного моделирования с учетом тектонических нарушений I и II рангов либо на основании обширных натуральных исследований напряжений в регионе, что является гораздо более трудоемким методом.

Тем не менее, перед проведением анализа численные модели должны быть верифицированы для получения наиболее корректного распределения величин напряжений.

Обсуждение результатов

В геодинамически опасных зонах могут проявляться отдельные виды геодинамических факторов или различное их сочетание [25]. Хотя количество аварий и динамических событий существенно различается в блоках с различной степенью напряженности и деформированности, большая часть из них приходится на граничные и внутриблоковые разломы. В первом приближении можно выделить следующие особенности разломных зон:

- вариации геомеханических характеристик геологической среды, современные проявления аномалий тектонических движений, как направленных, так и колебательных, а также напряженного состояния породных массивов;
- накапливающиеся изменения состояния и структуры горных пород: повышенная трещиноватость, уменьшение пористости, закрытие трещин,

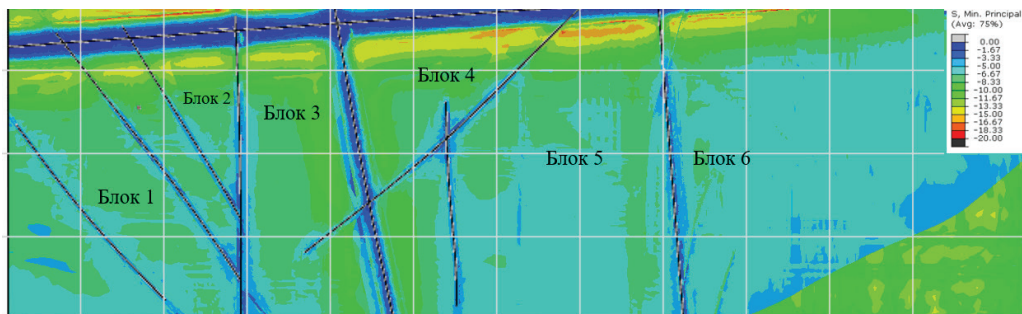


Рис. 6. Изохроны распределения наибольших главных напряжений в плане горизонта -150 м
 Fig. 6. Isochromes of the main stress distribution on the horizon -150 m

увеличение порового водяного и газового давления, уплотнение структуры пород и повышение их способности к накоплению упругой энергии [6, 12];

– протекание процессов метаморфизма, приводящих к существенным изменениям физико-механических и химических свойств породного массива; способность накапливать и проводить флюиды.

Особые свойства разломных зон, прежде всего тектоническая подвижность, делают их более чувствительными к внешним воздействиям: подвижные зоны разломов способны откликаться на различные колебательные процессы, включая как природные (метеорологические явления, микросейсмы, сейсмические волны), так и техногенные.

Для повышения достоверности геодинамического районирования необходимо проведение теоретических исследований, включающих типизацию свойств нарушений и определение степени их влияния на напряженно-деформированное состояние в зависимости от типа; разработка рекомендаций по геологическому изучению массива на основании данных, потребных для обоснования моделей поведения материалов, соответствующих выбранному механическому поведению массива [26, 27].

Для этих целей необходимо на стадии предпроектных изысканий опреде-

лять перечень требуемых для изучения исходных данных и границ изменения физико-механических свойств для дальнейшего использования их в подходящих моделях поведения сред. Сами модели поведения также должны быть доработаны, в частности, необходима разработка принципов представления блочных и трещиноватых массивов не только для условий прочных хрупких пород, но также и для приразломных зон.

Применение комплексного подхода позволит оценить негативные факторы на основании статических плоских и пространственных геолого-структурных моделей с воссозданием картины нетронутого массива; в дальнейшем учесть изменения геометрии, свойств и напряженно-деформированного состояния массива, обусловленные ведением горных работ и иных форм недропользования.

Заключение

Тектонические нарушения являются сложными структурами, изучению которых уделяется недостаточное внимание. Изучение свойств и механики поведения разломов должно производиться планомерно, комплексно; начинаться со стадии предпроектных работ и продолжаться до окончания эксплуатации месторождения. В работе показана необходимость учета влияния

тектонических нарушений на напряженно-деформированное состояние массива до начала ведения горных работ для месторождений солей, на основании чего могут быть уточнены результаты геодинамического районирования. Предложен комплексный подход, позволяющий с достаточной степенью достоверности произвести оценку расположения геодинамически опасных зон и опасных геодинамических факторов на месторождениях солей, который может применяться и на других типах месторождений.

Вклад авторов

Шабаров А. Н. — генерация идеи, постановка задач статьи; написание текста статьи.

Смирнов Э. В. — выполнение систематизации материалов и анализа полученных данных; написание текста статьи.

Авторы выражают признательность за помощь в подготовке материалов статьи сотрудникам Научного центра геомеханики и проблем горного производства: старшему научному сотруднику Гусевой Н. В., научному сотруднику Мукминовой Д. З., ведущим инженерам Кравчуку А. В. и Локтюковой О. Ю., а также сотруднику проектно-аналитического управления ПАО «Уралкалий» ведущему инженеру Шевелёву И. М.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козырев А. А., Савченко С. Н., Панин В. И., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Федотова Ю. В., Козырев С. А.* Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 470 с. DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-391-7.

2. *Батулин Е. Н., Меньшикова Е. А., Блинов С. М., Наумов Д. Ю., Белкин П. А.* Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6.

3. *Sinegubov V.* Predicting the stress-strain state of a massif at the stage of creating a protective cover in the conditions of developing iron ore deposits under water-bearing strata // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019, vol. 8(1), pp. 133–138.

4. *Морозов К. В., Демёхин Д. Н., Котлов С. Н., Абашин В. И.* Шахтные экспериментальные исследования фильтрационных свойств горных пород на глубоких горизонтах месторождений калийных солей для создания водозащитных перемычек // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 25–33. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04.

5. *Viladkar M. N.* Geomechanical Challenges: Practices and Innovations // Indian Geotechnical Journal. 2018, vol. 48, pp. 1–51. DOI: 10.1007/s40098-017-0285-z.

6. *Rasskazov M., Tereshkin A., Tsoi D., Konstantinov A., Miroshnikov V., Bagautdinov I., Kozhogulov K.* Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula // E3S Web Conf. 2020, vol.192, 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201009.

7. *Филатов В. В., Болотнова Л. А.* О подобии и иерархии тектонических структур // Известия вузов. Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 52–59. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-1-52-59.

8. Стефанов Ю. П., Бакеев Р. А., Ребецкий Ю. Л., Конторович В. А. Структура и стадии формирования разломной зоны в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физическая мезомеханика. — 2013. — Т. 16. — № 5. — С. 41–52. DOI: 10.1134/S1029959914030059.

9. Зувев Б. Ю., Истомин Р. С., Обожица Е. П. Физическое моделирование нелинейных геомеханических процессов при разработке калийных месторождений // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 75–80. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.11.

10. Шабаров А. Н., Заморкина Ю. В., Попов А. Л., Багаутдинов И. И. Комплексный подход при геодинамическом районировании шахтных полей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № S49. — С. 496–506.

11. Ломов М. А., Константинов А. В., Терешкин А. А. Перспективные методы оценки и контроля геомеханического состояния массивов пород // Проблемы недропользования [Электронный ресурс]: рецензируемое сетевое периодическое научное издание, ИГД УрО РАН. — 2019. — № 4(23). — С. 83–90. DOI: 10.25635/2313–1586.2019.04.083.

12. Трушко В. Л., Протосеня А. Г. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 162–166. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162.

13. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Anikin P. A. Methods and results of burst-hazard assessment in the underground mines of Russian Far East // Rockbursts and seismicity in mines: Proceeding of the 8th International Symposium, Saint-Petersburg, 2013, pp. 319–322.

14. Макеев В. М., Макарова Н. В., Дорожко А. Л., Суханова Т. В., Коробова И. В., Бондарь И. В. Неотектоника и современная геодинамика территории Верхнекамского месторождения калийных солей // Вестник Пермского университета. Геология. — 2017. — Т. 16. — № 4. — С. 354–369. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.354.

15. Шкуратский Д. Н., Скопинов М. В., Смирнов Э. В., Барях А. А. Ликвидация потенциально опасных участков на калийных рудниках // Горный журнал. — 2023. — № 3. — С. 5–12. DOI: 10.17580/gzh.2023.03.01.

16. Beiniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classification. A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil and Petroleum Engineering. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1989, 251 p.

17. Sherpa M., Hagan P. The Effect of Joint Properties on a Discontinuous Rock Mass // MEA Research Projects Review. 2013, no. 2, pp. 75–81.

18. Zhang Y., Mitri H. Stability assessment of non-entry stopes using nonlinear finite element analysis // Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium — Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demands. 2007, vol. 2, pp. 1347–1351. DOI: 10.1201/NOE0415444019-c167.

19. Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б., Остапчук А. А. Сейсмический портрет разломных зон. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. — 2010. — № 1(4). — С. 419–440.

20. Achdou Y., Giraud P. N., Lasry J. M. A Long-Term Mathematical Model for Mining Industries // Appl Math Optim. 2016, vol. 74, pp. 579–618. DOI: 10.1007/s00245–016–9390–0.

21. Кудряшов А. И., Васюков В. Е., Фон-дер-Лаасс Г. С. и др. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / под науч. ред. А. И. Кудряшова. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2004 — С. 158–167.

22. Singh M., Singh B. Laboratory and Numerical Modelling of a Jointed Rock Mass // 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. 2008, no. 2, pp. 1373–1380.

23. Кассин Г. Г., Филатов В. В. К проблеме геодинамического районирования территории Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевого солей // Известия УГГУ. — 2001. — № 13. — С. 186–191.

24. Мерзликин А. В., Захарова Л. Н. Особенности кинематики сдвижений массива горных пород в процессе развития малоамплитудного нарушения // Записки Горного института. — 2018. — Т. 231. — С. 235. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235.

25. Korchak P. A., Karasev M. A. Geomechanical prediction of the brittle fracture zones in rocks in the vicinity of the excavation junction of Ltd Apatit mines // Sustainable Development of Mountain Territories. 2023, vol. 15(1), pp. 67–80. DOI: 10.21177/1998–4502–2023–15–1–67–80.

26. Yang F., Fan J., Yang Zh., Liu W., Chen J. Plasticity analysis and constitutive model of salt rock under different loading speeds // Journal of Energy Storage. 2023, vol. 67, 107583. DOI: 10.1016/j.est.2023.107583.

27. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Кузиев Д. А., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Бабырь Н. В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2. **ГИАЭ**

REFERENCES

1. Kozyrev A. A., Savchenko S. N., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V., Fedotova Yu. V., Kozyrev S. A. Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and geodynamic risk management. Apatites: FITC KNC RAS. 2019, 470 p. [In Russ]. DOI: 10.25702/KSC. 978–5–91137–391–7.

2. Baturin E. N., Menshikova E. A., Blinov S. M., Naumov D. Yu., Belkin P. A. Problems of development of the largest potash deposits in the world. *Modern problems of science and education*. 2012, no. 6. [In Russ].

3. Sinegubov V. Predicting the stress-strain state of a massif at the stage of creating a protective cover in the conditions of developing iron ore deposits under water-bearing strata. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019, vol. 8(1), pp. 133–138.

4. Morozov K. V., Demekhin D. N., Kotlov C. N., Abashin V. I. Mine experimental studies of the filtration properties of rocks in deep horizons of potassium salt deposits to create waterproof bridges. *Mining Journal*. 2023, no. 5, pp. 25–33. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04.

5. Viladkar M. N. Geomechanical Challenges: Practices and Innovations. *Indian Geotechnical Journal*. 2018, vol. 48, pp. 1–51. DOI: 10.1007/s40098–017–0285–z.

6. Rasskazov M., Tereshkin A., Tsoi D., Konstantinov A., Miroshnikov V., Bagautdinov I., Kozhogulov K. Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula. *E3S Web Conf*. 2020, vol. 192, 01009. [In Russ]. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201009.

7. Filatov V. V., Bolotnova L. A. On the similarity and hierarchy of tectonic structures. *Izvestiya vuzov. Mining magazine*. 2019, no. 1, pp. 52–59. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536–1028–2019–1–52–59.

8. Stefanov Yu. P., Bakeev R. A., Rebetsky Yu. L., Kontorovich V. A. Structure and formation stages of a fault zone in a geomeidium layer in stick-slip displacement of the base. *Physical Mesomechanics*. 2013, vol. 16, no. 5, pp. 41–52. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1029959914030059.
9. Zuev B. Yu., Istomin R. S., Obozhina E. P. Physical modeling of nonlinear geomechanical processes in the development of potash deposits. *Mining Journal*. 2023, no. 5, pp. 75–80. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.11.
10. Shabarov A. N., Zamorina Yu. V., Popov A. L., Bagautdinov I. I. An integrated approach to geodynamic zoning of mine fields. *Mining informational and analytical bulletin*. 2018, no. 549, pp. 496–506. [In Russ].
11. Lomov M. A., Konstantinov A. V., Tereshkin A. A. Promising methods of assessment and control of the geomechanical state of rock massifs. *Problems of subsurface use [Electronic resource]: peer-reviewed network periodical scientific publication, IGD UrO RAS*. 2019, no. 4(23), pp. 83–90. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313–1586.2019.04.083.
12. Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects for the development of geomechanics in a new technological way. *Notes of the Mining Institute*. 2019, vol. 236, pp. 162–166. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162.
13. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Anikin P. A. Methods and results of burst-hazard assessment in the underground mines of Russian Far East. *Rockbursts and seismicity in mines: Proceeding of the 8th International Symposium, Saint-Petersburg, 2013*, pp. 319–322.
14. Makeev V. M., Makarova N. V., Dorozhko A. L., Sukhanova T. V., Korobova I. V., Bondar I. V. Neotectonics and modern geodynamics of the territory of the Verkhnekamsk potash deposit. *Bulletin of the Perm University. Geology*. 2017, vol. 16, no. 4, pp. 354–369. [In Russ]. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.354.
15. Shkuratsky D. N., Skopinov M. V., Smirnov E. V., Baryakh A. A. Liquidation of potentially dangerous sites at potash mines. *Mining Journal*. 2023, no. 3, pp. 5–12. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.03.01.
16. Beiniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classification. A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil and Petroleum Engineering. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1989, 251 p.
17. Sherpa M., Hagan P. The Effect of Joint Properties on a Discontinuous Rock Mass. *MEA Research Projects Review*. 2013, no. 2, pp. 75–81.
18. Zhang Y., Mitri H. Stability assessment of non-entry stopes using nonlinear finite element analysis. *Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium – Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demands*. 2007, no. 2, pp. 1347–1351. DOI: 10.1201/NOE0415444019-c167.
19. Kocharyan G. G., Kishkina S. B., Ostapchuk A. A. Seismic portrait of fault zones. What can an analysis of the fine structure of the spatial location of the foci of weak earthquakes give? *Geodynamics and tectonophysics*. 2010, no. 1(4), pp. 419–440. [In Russ].
20. Achdou Y., Giraud P. N., Lasry J. M. A Long-Term Mathematical Model for Mining Industries. *Appl Math Optim*. 2016, vol. 74, pp. 579–618. DOI: 10.1007/s00245–016–9390–0.
21. Kudryashov A. I., Vasyukov V. E., Von der Laass G. S., et al. Discontinuous tectonics of the Verkhnekamsk salt deposit. Ed. by A. I. Kudryashov. Perm: GI UrO RAS, 2004, pp. 158–167. [In Russ].
22. Singh M., Singh B. Laboratory and Numerical Modelling of a Jointed Rock Mass. *12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. 2008, no. 2, pp. 1373–1380.

23. Kassin G. G., Filatov V. V. On the problem of geodynamic zoning of the territory of the Verkhnekamsk deposit of potassium and potassium-magnesium salts. *Izvestiya UGSU*. 2001, no. 13, pp. 186–191. [In Russ].

24. Merzlikin A. V., Zakharova L. N. Features of kinematics of rock mass movements in the process of low-amplitude disturbance development. *Notes of the Mining Institute*. 2018, vol. 231, p. 235. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235.

25. Korchak P. A., Karasev M. A. Geomechanical prediction of the brittle fracture zones in rocks in the vicinity of the excavation junction of Ltd Apatit mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15(1), pp. 67–80. DOI: 10.21177/1998–4502–2023–15–1–67–80.

26. Yang F., Fan J., Yang Zh., Liu W., Chen J. Plasticity analysis and constitutive model of salt rock under different loading speeds. *Journal of Energy Storage*. 2023, vol. 67, 107583. DOI: 10.1016/j.est.2023.107583.

27. Rybak Ya., Khairutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Suryun Ch. B., Bobyr N. V. Forecasting the geomechanical state of the massif during mining of salt deposits with a bookmark. *Notes of the Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 61–70. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шабаров Аркадий Николаевич — докт. техн. наук, директор Научного центра геомеханики и проблем горного производства, <http://orcid.org/0000-0001-7925-3163>, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 2¹ линия д.2, Россия, e-mail: post@spmi.ru;
Смирнов Эдуард Владимирович — заместитель генерального директора –технический директор, ПАО «Уралкалий», 618426, Пермский край, г. Березники, ул. Пятилетки, 63, Россия.

Для контактов: *Шабаров Аркадий Николаевич*, e-mail: post@spmi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shabarov A. N., Dr. Sci. (Eng.), Director of the Scientific Center for Geomechanics and Mining Issues, <http://orcid.org/0000-0001-7925-3163>, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 line, 2, Russia, e-mail: post@spmi.ru;
Smirnov E. V., Deputy General Director – Technical Director, Uralkali, 618426, Perm Krai, Berezniki, ul. Pyatiletki, 63, Russia.

Corresponding author: *Shabarov A. N.*, e-mail: post@spmi.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 07.10.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 17.06.2024; received after the review 07.10.2024; accepted for printing 10.10.2024.

