

## ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРОХОДКИ СБЛИЖЕННЫХ КАПИТАЛЬНЫХ КАМЕРНЫХ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А.Н. Каюмова<sup>1</sup>, А.Е. Балек<sup>1</sup>, Т.Ф. Харисов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения РАН, Россия, e-mail: alfkaa@mail.ru

**Аннотация:** Актуальность исследования обусловлена распространенностью проблемы строительства и крепления капитальных выработок большого объема и сближенных выработок для безопасной разработки месторождений в сложных горно-геологических условиях. Ранее исследования проводились для условий упругой однородной среды. Особенностью настоящих исследований является представление реального массива горных пород иерархически блочной структурой, в которой формируются дискретные, мозаично-неоднородные и переменные во времени структуры напряженно-деформированного состояния. В связи с этим, проблемы обеспечения устойчивости в массивах IV–V категории требуют адаптации существующих методов оценки устойчивости и безопасности в части исследований реальных условий разработки массива горных пород и создания условий безопасной выемки полезного ископаемого на основе полученных данных. В рамках работы получены новые экспериментальные данные. Математическая обработка данных путем решения обратной геомеханической задачи позволила дать прогнозную оценку инженерно-геологических и геомеханических условий для обоснования исходных геомеханических характеристик массива горных пород на участке строительства горно-капитальных выработок 2-й очереди шахты «Десятилетие независимости Казахстана» Донского ГОКа, необходимые проектной организации. На основании материалов исследований установлено, что взаимное влияние сближенных выработок является существенным в породах III, IV и V категорий устойчивости, размеры зон влияния при различных глубинах достигают значительных размеров, распространяясь на 3–7 радиусов от центра выработки. Строительство и поддержание большеобъемных горных выработок требует учета процессов запредельного деформирования породного массива, происходящих вокруг выработок для определения очередности строительства выработок, отставания от забоя и выбора типа крепи.

**Ключевые слова:** капитальные горные выработки, анкерная крепь, устойчивость выработок, сложные горно-геологические условия, геодинамика, тензор деформаций, напряженно-деформированное состояние.

**Благодарность:** Работа выполнена в ходе реализации государственного задания по теме № 075-00412-22 ПР.

**Для цитирования:** Каюмова А. Н., Балек А. Е., Харисов Т. Ф. Оценка безопасности проходки сближенных капитальных камерных выработок в сложных горно-геологических и геотехнических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 131–147. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_131.

---

## Assessment of heading safety in close-spaced permanent roadways in difficult geological and geotechnical conditions

A.N. Kayumova<sup>1</sup>, A.E. Balek<sup>1</sup>, T.F. Kharisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,  
e-mail: alfkaa@mail.ru

---

**Abstract:** The relevance of the research is governed by the common nature of the problem connected with construction and support of large and closely-spaced roadways to be safe in difficult mining conditions. The earlier research addressed a uniform elastic medium. The present study represents a real-life rock mass as a hierarchy of blocks with discrete, mosaically nonuniform and time-variant stress-strain structures. In connection with this and to ensure stability in IV–V category rock masses, the existing safety and stability assessment procedures need being adapted to the real-life mineral mining conditions towards safety of mine operations on the basis of the obtained data. The present research produced new experimental evidence. The mathematical processing of the data by means of solving an inverse problem of geomechanics enabled predicting geomechanical and geotechnical conditions for the justification of the initial geomechanical characteristics of rock mass in the construction site of phase II permanent roadways in Kazakhstan's 10th Anniversary of Independence Mine, Don GOK, as requested by a design institution. It is found from the research that the mutual effect of the close-spaced roadways is high in rocks having stability categories III, IV and V and the influence zones may be very large and extend to 3–7 radii from the roadway center at different depths. Construction and support of large roadways requires taking into account post-limiting deformation processes in enclosing rock mass surrounding the roadways for planning and selecting the construction sequence, the distance between the face and support installation and the support design.

**Key words:** permanent roadway, rock bolt support, roadway stability, difficult geological conditions, geodynamics, strain tensor, stress-strain behavior.

**Acknowledgements:** The study was supported in the framework of the state contract, Topic No. 075-00412-22 PR.

**For citation:** Kayumova A. N., Balek A. E., Kharisov T. F. Assessment of heading safety in close-spaced permanent roadways in difficult geological and geotechnical conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):131-147. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_131.

---

### Введение

В разрабатываемых месторождениях уникальные особенности залегания полезного ископаемого накладываются на большие глубины ведения горных работ. В сложных горно-геологических условиях возникает проблема обеспечения устойчивости большеобъемных камерных выработок и выработок, которые находятся в области взаимного влияния.

Глубина заложения шахтных стволов в России преступила отметку в 2000 м при средних значениях 800 – 1300 м. На долю глубокозалегающих месторождений по средним оценкам приходится до 1/3 стоимости и до 1/2 общих средств, направленных на строительства рудника в целом [1]. Этап проектирования, предшествующий этапу строительства, предполагает использование общеизвестных

и апробированных методик расчета устойчивости подземных горных выработок различного назначения, в том числе, большеобъемных или находящихся в зоне взаимного влияния. Обозначенные методики расчета на стадии проектирования используют данные изысканий. В настоящее время существует ряд сложностей для обоснования безаварийной работы рудника, так как условия разработки значительно изменяются при увеличении глубины ведения горных работ. Расчет устойчивости на больших глубинах заключается в оценке напряженно-деформированного состояния массива и крепи большеобъемных выработок и взаимовлияющих выработок в низкопрочном раздробленном массиве, с учетом влияния постоянно действующих гравитационных и тектонических напряжений, превышающих предел прочности.

Предыдущие исследования по устойчивости взаимовлияющих подземных выработок в низкопрочном массиве были

выполнены в работах [2–10]. Исследованиями установлено, что в условиях упругой однородной среды, например в устойчивых массивах I, II и III категорий, радиус зоны влияния каждой выработки равен ее ширине или превышает ширину в 1,5 раза. В условиях угольного массива исследованиями установлена зона деформирования одиночной выработки составляющая 2–2,5 ширины этой выработки [11]. Данные исследования характерны для условий упругой однородной среды. В табл. 1 кратко приведен обзор проведенных исследований, направленных на исследование напряженно-деформированного состояния массива подземных горных выработок, находящихся в условиях взаимного влияния.

В обзорной таблице видно, что большинство исследователей проводили натурные наблюдения за состоянием массива и крепи подземной горной выработки, в сильно-трещиноватых горных породах на небольших глубинах до 250 м

Таблица 1

**Исследования НДС взаимовлияющих подземных горных выработок и камер большого объема**  
***Stress-strain analysis of cross-influencing roadways and rooms of large size***

Автор исследования, год	Модель породного массива, постановка задачи	Метод расчета НДС	Сфера применения
Ларионов Р.И., 2007	Упруго-пластическая модель Плоская задача	Метод конечных элементов	Строительство тоннелей на СКЖД
Безродный К.П., Лебедев М.О., 2017	Упруго-пластическая модель Плоская задача	Метод конечных элементов	Строительство тоннелей на СКЖД, метро, глубина до 40 м
Протосеня А.Г., 2015	Упруго-пластическая модель Объемная постановка задачи	Метод конечных элементов	Комплекс тоннельных выработок (автомобильные и железнодорожные, камеры большого заложения, глубина 250 м)
Саммаль А.С., Фотиева Н.Н., Деев П.В., 2012	Упруго-пластическая модель Плоская задача	Метод конечных элементов	Горные выработки в зонах тектонического и сейсмического воздействия, параллельные взаимовлияющие выработки на небольшой глубине до 40 м

для условий строительства тоннелей на СКЖД или метрополитена. Во всех приведенных случаях для решения вопроса обеспечения безаварийности строительства тоннелей использовались методы численного моделирования (МКЭ), модель породного массива принималась как упруго-пластическая модель, тарировка которой производилась на результатах натурных измерений конвергенции стенок выработок в процессе их проходки. Задача устойчивости горной выработки решалась как плоская задача, действующие гравитационные и тектонические напряжения не превышали предел прочности.

Таким образом, расчеты были произведены в условиях изотропной линейно-деформируемой среды. Дополнительно исследователями изучалось влияние очередности проходки горных выработок, технология, выбор вида крепи в зависимости от вида выработки [11 – 15]. Исследования, изучающие практику ведения подземных горных работ при проходке стволов на больших глубинах, массивы которых характеризуются повышенным полем напряжений, в настоящее время необходимы для применения в расчетах проектными организациями. Сложные горно-геологические условия залегания полезного ископаемого или строительства подземных сооружений предполагают научное сопровождение.

Таким образом, практика строительства и проходка капитальных выработок большого объема или сближенных выработок в неустойчивых массивах не располагает универсальным аппаратом для расчетов и нуждается в дальнейшем изучении, поэтому результаты исследований по этой теме представляют собой интерес для научной общественности. Результаты исследования применены для решения практической задачи обеспечения безаварийности процесса добычи полезных ископаемых на больших глу-

бинах в условиях взаимного влияния горных выработок.

Область исследований данной работы – подземные горные работы глубиной разработки 500 м и более. При достижении этого показателя массив переходит в состояние неупругого деформирования, при котором возможны взаимные подвижки структурных геоблоков. Массив деформируется как дискретная блочная модель. Закономерности, выявленные при моделировании в условиях неупругой модели массива, подлежат анализу и представляют собой научный интерес.

Особенностью настоящих исследований является представление реального массива горных пород иерархически блочной структурой, в которой формируются дискретные, мозаично-неоднородные и переменные во времени структуры напряженно-деформированного состояния. В связи с этим, проблемы обеспечения устойчивости в массивах IV – V категории требуют адаптации существующих методов оценки устойчивости и безопасности в части исследований реальных условий разработки массива горных пород. Анализ и исследование закономерностей распределения деформаций при разработке большеобъемной выработки или взаимовлияющих выработок позволит обеспечить безаварийное строительство и поддержание горных выработок, проходимых в территориально стесненных условиях в тектонически напряженных низкопрочных массивах.

Для достижения поставленной цели в рамках работы проанализированы предыдущие многолетние исследования массива, проведены натурные исследования структурного строения, напряженно-деформированного состояния и проявлений геодинамической активности в условиях серпентинизированного массива шахты «Десятилетие независимости Казахстана». Результаты исследова-

ний позволяют дать прогнозную оценку инженерно-геологических и геомеханических условий для обоснования исходных геомеханических характеристик массива горных пород на участке строительства горно-капитальных выработок 2-й очереди шахты на горизонтах –480 и –580 м, необходимые проектной организации.

### **Объект исследований**

Исследуемый массив – шахта «Десятилетие независимости Казахстана» Донского ГОКа. Объект исследований – крепь и окружающий породный массив горно-капитальных выработок околоствольных дворов стволов 2-й очереди шахты «Десятилетие независимости Казахстана», строящихся и эксплуатируемых в условиях тектонически напряженных низкопрочных трещиноватых массивов серпентинизированных скальных горных пород.

Особенностью месторождения являются сложные гидрогеологические и инженерно-геологические условия. Строительство и поддержания горно-капитальных выработок вызывает сложности из-за свойств массива. Тектонически напряженный низкопрочный массив характерен для трещиноватых скальных горных пород. В данных условиях, несмотря на сравнительно высокую прочность горных пород в образцах, нарушения устойчивости приконтурного массива подземных выработок происходят даже при сравнительно небольших обнажениях и невысоком уровне напряжений и деформаций. При этом вокруг любых строящихся выработок, как горизонтальных, так и вертикальных, формируется аномально большая зона подвижных породных блоков (зона неупругих деформаций), осложняющая проходку и эксплуатацию соседних выработок.

Для условий строительства околоствольных дворов стволов «Вентиляци-

онный» и «Скиповой» 2-й очереди шахты «Десятилетие независимости Казахстана» задача усложняется вследствие возросших глубин и территориально стесненных условий взаимного влияния проходимых выработок (рис. 1). Решение поставленной задачи возможно с учетом особенностей формирования нагрузок на крепь выработок руддворов 2-й очереди шахты в условиях стесненного размещения выработок с учетом специфики свойств и напряженно-деформированного состояния окружающего породного массива.

В качестве вмещающего практически в данном случае повсеместно присутствует иерархически блочный серпентинизированный массив перидотитово-дунитовых скальных горных пород, который отличается чрезвычайно низкой устойчивостью и имеющий следующие физико-механические свойства:

- предел прочности на одноосное сжатие –45 ÷ –90 МПа;
- предел прочности на растяжение 5 ÷ 9 МПа;
- характер разрушения – хрупкий;
- статический модуль упругости – 35 ÷ 40 ГПа;
- статический коэффициент Пуассона – 0,25 ÷ 0,30.

Аварии обусловлены разбитостью многочисленных хаотичных трещин и разноориентированными тектоническими нарушениями на структурные блоки различных масштабно иерархических уровней.

Связи между блоками слабы, а при увлажнении, когда тальковидный милонитовый или серпофитовый заполнитель трещин становится мыльным на ощупь, падают практически до нуля. Кроме этого, на обнажениях серпентинизированные породы склонны к ускоренному выветриванию, вплоть до мелкоблочного состояния, с дилатационным увеличением объема.

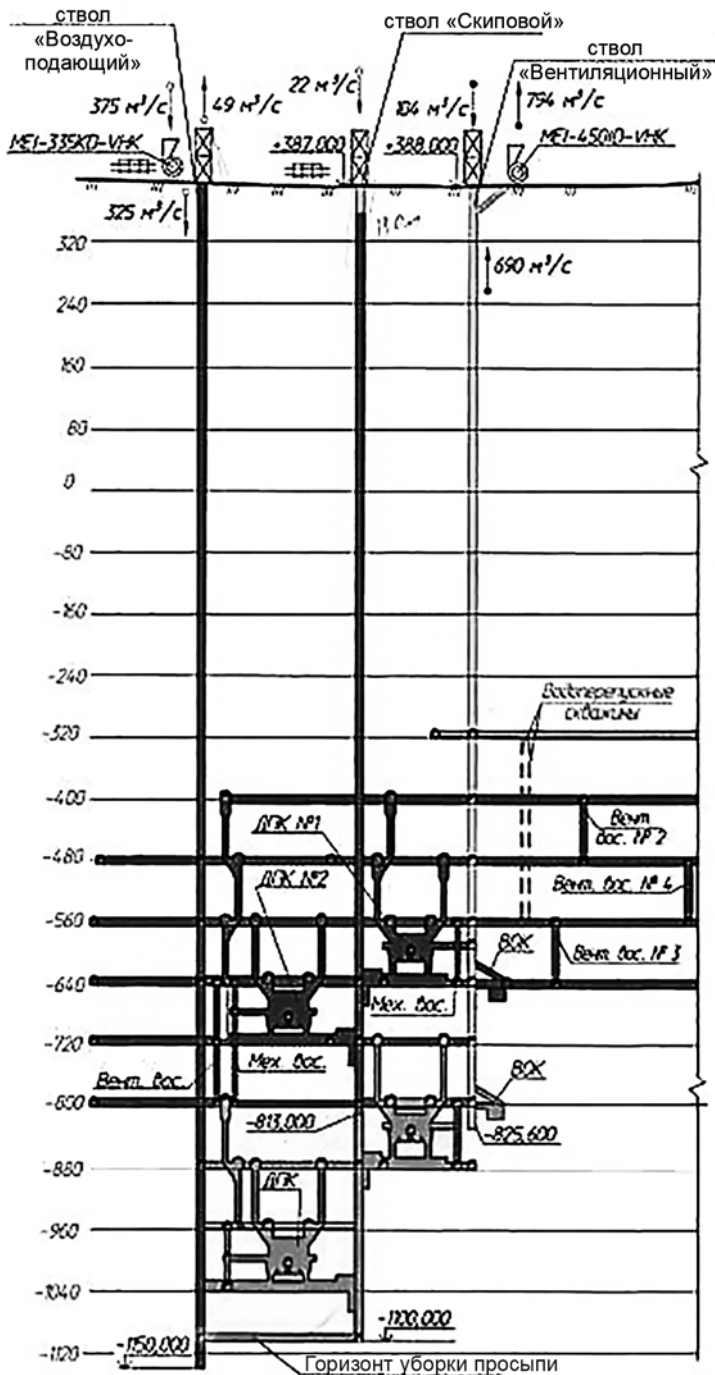


Рис. 1. Комплекс горно-капитальных выработок дробильно-перепускного комплекса 2-й очереди шахты «Десятилетие независимости Казахстана» на вертикальной проекции

Fig. 1. System of permanent crushing and by-pass roadways of Kazakhstan's 10th Anniversary of Independence Mine phase II, elevation view

В таких условиях, нарушения устойчивости приконтурного массива выработок зачастую требует применения при проходке опережающей штанговой крепи («проколотов») для удержания породных блоков от вывалов. В массиве происходят горизонтальные подвижки крупных породных объемов — блоков. Эти подвижки приводят к нарушениям железобетонной крепи: сколам бетона и выпираниям арматуры в своде, выпираниям стоек арочной крепи в стенках, сколам и выпираниям бетонной заливки в почве, и даже к нарушениям чугунных тубингов.

Дополнительно при строительстве большеобъемных камер дробильно-перепускных комплексов важно учитывать взаимное влияние выработок околоствольных дворов и ограниченную территорию площадки под строительство. Положение усугубляется неизвестностью, первоначально при проектировании горных работ геомеханические свойства горного массива были определены лишь для участка 1-й очереди шахты, который находится на расстоянии 3,5 км от района строительства. Обеспечение требований безопасности необходимо учитывать при проектировании подземных горных выработок, и в дальнейшем при строительстве, при этом размеры зоны деформирования должны учитываться с учетом особенностей месторождения, после проведения изысканий. Если не удастся учесть на стадии проектирования выработки и разнести их подальше друг от друга, то необходимо обеспечивать безопасность подземных разработок, изменяя последовательность прохождения выработок и используя определенные виды крепи.

### **Методы исследований**

Современные модельные представления о дезинтегрированном низкопрочном породном массиве не позволяют

дать точный теоретический прогноз о количественных параметрах его напряженно-деформированного состояния и их изменчивости в пространстве и времени на различных масштабных уровнях. Получить такого рода данные можно лишь путем натуральных сопоставительных исследований напряженно-деформированного состояния различных участков породного массива. При этом следует использовать эффект концентрации и управляемых изменений напряженно-деформированного состояния в процессе ведения горных работ: проходки выработок, выемки карьеров, формирования зон обрушений.

Таким образом, при выполнении исследований был задействован комплекс прямых (деформационных) методов инструментальных замеров с использованием эффекта концентрации и управляемых изменений НДС при ведении горных работ.

Для решения поставленной задачи — обеспечения безаварийности строительства и поддержания горно-капитальных выработок околоствольных дворов стволов 2-й очереди шахты «Десятилетие независимости Казахстана», проходимых в территориально стесненных условиях взаимного влияния в тектонически напряженных низкопрочных массивах серпентинизированных горных пород был выполнен ряд исследований:

- натурные исследования структурного строения, НДС и проявлений геодинамической активности рудопородного массива шахты «Десятилетие независимости Казахстана»;
- математическая обработка результатов натуральных исследований на различных пространственно-временных базах и выявление параметров НДС породного массива на участке строительства горно-капитальных выработок 2-й очереди шахты путем решения обратной геомеханической задачи.

Для выявления геомеханических свойств исследуемого горного массива проведен комплекс натуральных исследований, предусматривающий использование общеизвестных деформационных методов, включающих:

- замеры напряжений в бетонной и тюбинговой крепи шахтных стволов методами щелевой разгрузки, а также деформаций реперных интервалов в процессе нагружения спинок тюбингов, с выходом на параметры НДС вмещающего породного массива на базах от нескольких метров до первых десятков метров;
- прямые замеры НДС вмещающего породного массива строящихся шахтных стволов на базах от нескольких метров до первых десятков метров методом частичной разгрузки приконтурного массива за счет уходки забоя с использова-

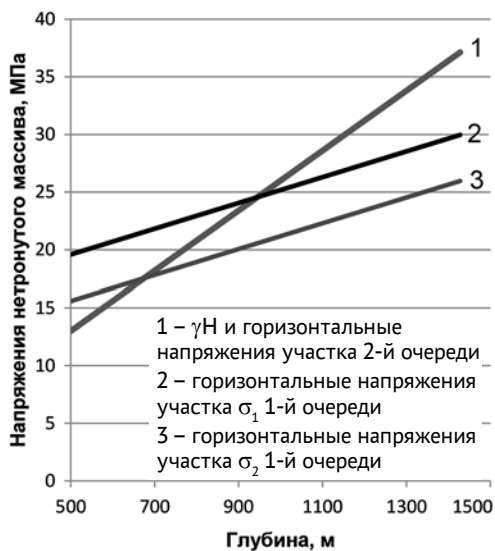


Рис. 2. Параметры природного поля напряжений горного массива шахты «Десятилетия независимости Казахстана», полученные на основании обобщения результатов натуральных замеров 1980–2021 гг.

Fig. 2. Natural stress field in rock mass of Kazakhstan's 10th Anniversary of Independence Mine from generalized in-situ measurements in 1980–2021

нием замеров смещений реперных пунктов маркшейдерскими методами [17];

- замеры смещений реперных пунктов на земной поверхности путем их повторного координирования методами спутниковой геодезии (GPS/GLONASS) с выходом на параметры изменений НДС породного массива на различных участках на базах от десятков и сотен метров до первых километров и, соответственно, на показатели геодинамической активности участков [18].

В данной работе используется методика совместных замеров параметров модуля упругости и напряженно-деформированного состояния массива горных пород на масштабных уровнях, превышающих размеры разгрузочных зон шпуров и скважин, для баз деформирования от нескольких метров и до первых десятков и более. Более подробно описание, методика проведения экспериментальных исследований, условия проведения эксперимента в условиях слабоустойчивого породного массива приведены в работе [19].

### Результаты исследований

Геомеханические свойства породного массива на объекте исследований были определены по результатам комплекса сопоставительных натуральных исследований. Выявлено, что на шахте «Десятилетия независимости Казахстана» в массивах горных пород, вмещающих горнокапитальные выработки околоствольных дворов, изменение главных нормальных компонент тензора природных напряжений по глубине  $H$  происходит в соответствии со следующими зависимостями, в графическом виде представленными на рис. 2:

- Вертикальные напряжения — на обоих участках изменяются в соответствии с приращением  $\gamma H$ ;
- Горизонтальные напряжения — определяются зависимостями:



На участке 1-й очереди:

$$\sigma_{\text{гор1}} = \lambda \gamma H + 14 \text{ МПа} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{гор2}} = \lambda \gamma H + (7 \div 10) \text{ МПа} \quad (2)$$

Азимут оси  $\sigma_{\text{max}}$  составляет  $45 \div 60^\circ$

На участке 2-й очереди:

$$\sigma_{\text{гор1}} = \sigma_{\text{гор2}} = \gamma H, \quad (3)$$

где  $\gamma = 0,026 \text{ МН/м}^3$  — объемный вес породного массива;  $H$  — рассматриваемая глубина, м.

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu} = 0,43, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — коэффициент бокового давления;  $\mu$  — коэффициент Пуассона породного массива,  $\mu = 0,3$ .

Физико-механические свойства и напряженно-деформированное состояние массивов скальных горных пород неразрывно связаны с пространственным и временным масштабами породных объемов, вмещающих объекты недропользования. Вследствие иерархически-блочной структуры горного массива геомеханические характеристики рассматриваемого породного объема определяются суперпозицией полей напряжений и деформаций, действующих на соответствующих масштабных уровнях, которые зависят от количественных параметров современной геодинамической активности и размеров подвижных структурных элементов. Вероятностная природа и пространственно-временная изменчивость данных показателей обуславливают необходимость проведения натуральных инструментальных исследований на различных масштабных уровнях.

По результатам замеров напряжений в крепи шахтных стволов выявлено, что на глубинах 500 — 600 м при неизменных геологических условиях и толщине крепи происходит резкое (в 5–6 раз) увеличение действующих напряжений, связанное с увеличением зоны сдерживающего влияния забоя: с 1,5–2 до 3–4 диаметров выработки. Соответственно, в разы уве-

личивается окружающая зона неупругих деформаций, что негативно сказывается на устойчивости прилегающих выработок.

Анализ векторов показывает, что в районе строительства выработок 2-й очереди замеренные смещения не превышают 10 мм, а в окрестностях стволов 1-й очереди они на порядок больше, и достигают 500 — 700 мм. Это наглядно свидетельствует о более низкой геодинамической активности участка 2-й очереди, который, судя по направленности векторов, находится в центральной части крупномасштабного (с поперечными размерами более 7–8 км) геоблока, поворачивающегося по часовой стрелке вместе со всем породным массивом шахты (см. рис. 3).

Таким образом, наблюдаются существенные качественные и количественные различия в напряженном состоянии рассматриваемых участков шахтного поля (1 и 2 очередь), что требует разработки новой методики инструментальных замеров и иной интерпретации параметров современных геодинамических движений, относительных деформаций и напряжений, в которой необходимо учесть следующие базовые положения:

- породный массив не является статической моделью — на различных пространственно-временных масштабных уровнях иерархически-блочных структур непрерывно происходят процессы дезинтеграции и самоорганизации, вследствие чего формируется подвижное и неоднородное поле деформаций и напряжений (поле НДС);

- НДС породного массива, вмещающего объект недропользования, представляет собой суперпозицию (наложение) разномасштабных деформационных полей, каждое из которых определяется параметрами взаимных движений самоорганизующихся блоковых структур соответствующего масштабного уровня.

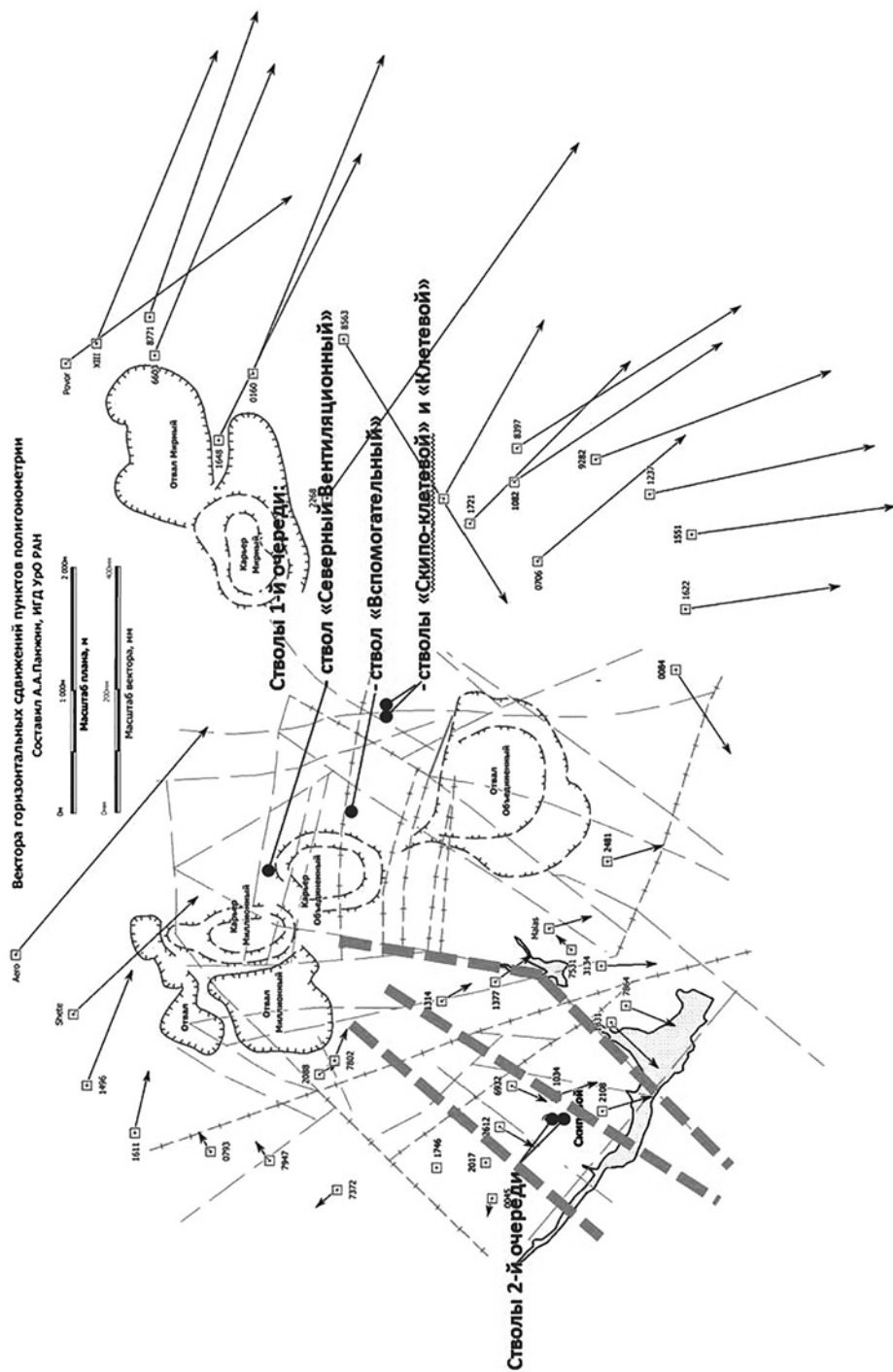


Рис. 3. Векторы горизонтальных смещений на плане поверхности поля шахты «Десятилетие независимости Казахстана» за период 1985–2016 гг., замеренные методами спутниковой геодезии (GPS / GLONASS) путем повторного координирования 40 реперных пунктов [18]

Fig. 3. Vectors of horizontal displacements in surface plane of Kazakhstan's 10th Anniversary of Independence Mine field over the period from 1985 to 2016, measured using satellite geodesy methods (GPWS / GLONASS) by means of re-coordination of 40 base stations [18]

## Практическое применение

Полученные данные исследования в породных массивах, вмещающих горно-капитальные выработки околоствольных дворов, и соответственно, находящиеся в зоне влияния очистных работ на базах деформирования от нескольких метров и более, позволяют дать прогнозную оценку инженерно-геологических и геомеханических условий и обосновать исходные геомеханические характеристики массива горных пород на участке строительства горно-капитальных выработок 2-й очереди шахты, необходимые для разработки проектной рабочей документации.

В качестве практического применения предложенных исследований, помимо прогноза устойчивости подземных выработок большого объема и параллельных выработок, рекомендуется использовать полученные геомеханические характеристики массива горных пород для разработки регламента строительства взаимовлияющих горно-капитальных выработок 2-й очереди шахты, предусматривающего минимизацию взаимного влияния выработок околоствольных дворов, камер дробильно-перепускных комплексов и других горно-капитальных выработок большого объема.

Таким образом, результаты исследований применимы для внедрения на геомеханических службах горных предприятиях, в качестве прогноза аварийных ситуаций, а также для разработки технологических инструкций. Если из всего множества горнотехнических систем в качестве ключевых выделить системы, обеспечивающие поддержание и безопасную эксплуатацию горных выработок с минимальными затратами, то к ним в первую очередь относятся технологии крепления и управления горным давлением, направленные на повышение устойчивости большеобъемных горных выработок: шахтных стволов, капиталь-

ных камер руддворов, тоннелей и пр. Для безопасного и эффективного применения этих технологий необходимо знание закономерностей их взаимодействия с природными процессами, протекающими в массиве вмещающих горных пород. Данные исследования применимы при проходке и креплении выработок в весьма неустойчивых породах и при подходе к зоне тектонических нарушений с целью предупреждения внезапных обрушений. Для этого необходимо:

- предусматривать временную крепь;
- уменьшать величину уходки выработки, ограничив ее до величины шага установки крепи;
- не допускать проведения выработок при отсутствии в забое сменного запаса крепежных материалов;
- не допускать проведения выработок (отпалку забоя) в последнюю смену перед нерабочими днями;
- после длительного забоя возобновлять работы только после тщательного осмотра, простукивания пород и оборки заколов.

В качестве одной из мер безопасности горных работ и безаварийной работы до начала очистных работ необходимо предусматривать меры охраны выработок и усиливать крепь выработок, попадающих в последующем в зону опорного давления. Соответственно, возведение постоянной монолитной бетонной крепи на участках, пройденных в весьма неустойчивых породах и вблизи тектонических нарушений, с применением временной арочной металлической крепи, рекомендуется производить без демонтажа временной крепи. При строительстве в зависимости от ширины выработки и категории устойчивости окружающего массива выбирается вид временной и постоянной крепи камерных выработок, параметры комбинированной временной крепи массива, способ про-

Таблица 2

**Способы строительства камерных выработок**  
**Roadway construction methods**

Сечение камер, м <sup>2</sup>	Временная крепь	Постоянная крепь	Способ проходки камер	Дополнительные технические мероприятия*
<b>III категория устойчивости массива</b>				
менее 15	комбинированная (анкер + металлическая сетка или армокаркасы + набрызгбетон)	монолитная железобетонная	сплошным забоем	–
более 15	комбинированная (анкер + металлическая сетка или армокаркасы + набрызгбетон)	монолитная железобетонная	уступным забоем; слоями сверху вниз	–
<b>IV категория устойчивости массива</b>				
менее 15	комбинированная (металлические рамы СВП 22 ÷ 27 вразбежку с затяжкой + различные виды анкеров)	монолитная железобетонная	сплошным забоем	возведение защитного экрана, опережающее крепление, инъектирование массива
более 15	комбинированная (металлические рамы СВП 22 ± 27 вразбежку с затяжкой + различные виды анкеров)	монолитная железобетонная	опертого свода; опертого ядра; слоями сверху вниз	возведение защитного экрана, опережающее крепление, инъектирование массива
* Примечание: при условии возможности их реализации в конкретных условиях.				

ходки для вспомогательных, откаточных и камерных большеобъемных капитальных выработок (табл. 2).

Последовательность работ по строительству камер в неустойчивом массиве определяется способом ее проведения. Существует ряд классических способов проведения камер: сплошным забоем, уступным забоем, слоями сверху вниз и снизу вверх, опорного ядра, опертого свода и др. Выбор того или иного способа зависит от параметров строящейся камеры, категории устойчивости массива, а также технических возможностей рудника (табл. 2).

В зоне сближенных выработок смещения пород и нагрузки на крепь выше, чем в одиночных выработках, что оказывает влияние на выбор типа и пара-

метров крепи. Взаимное влияние сближенных выработок является несущественным в породах I и II категории при расположении их на двойном расстоянии наибольшего их размера. Размеры зон влияния при различных глубинах в породах III, IV и V категорий устойчивости, как наиболее распространенных в условиях неустойчивого дезинтегрированного массива, представлены в табл. 3.

При отсутствии возможности исключить взаимное влияние выработок путем их разности друг от друга на расстояние, превышающее радиус зоны разрушения окружающего массива, необходимо соблюдать очередность проходки и крепления выработки. Тип крепи и ее параметры для сближенных выработок

Таблица 3

**Внешние радиусы зоны взаимного влияния выработок**  
**External radii of mutual influence zones of roadways**

Категория устойчивости	Внешний радиус зоны разрушения для разных интервалов глубин, м		
	700–1000	1000–1200	1200–1400
III	2,5	3	3,5
IV	6,0	6,5	7,5
V	6,5	7,5	8,0

следует принимать в зависимости от устойчивости пород согласно табл. 2.

На основании полученных данных исследований рекомендуемая очередность строительства двух сближенных выработок заключается в последовательной проходке и возведении постоянной крепи после реализации основных деформационных процессов, вызванных проходкой.

В неустойчивых породах первую одиночную выработку следует крепить только с применением временной крепи. Постоянная крепь временно не возводится. Затем производится проходка и крепление второй выработки, которая будет находиться в зоне неупругого деформирования и разрушения, сформировавшаяся в процессе проходки первоначальной выработки. Возведение временной и постоянной крепи производится в зависимости от категории устойчивости массива. После окончания строительства второй выработки, необходимо визуально осмотреть первую выработку на предмет нарушений приконтурного массива и целостности временной крепи. При выявлении каких-либо нарушений выполнить ее ремонт, и возводить постоянную крепь согласно технологическому регламенту.

При проходке сближенных выработок, одна из которых является большеобъемной с шириной более 6 м, первоочередной строящейся выработкой является большеобъемная закрепленная постоянной железобетонной крепью. После чего вы-

полняется проходка сближенной протяженной выработки, которая находится в зоне влияния первой выработки. При этом протяженная выработка крепится согласно табл. 2, чтобы зона деформирования, формирующаяся в процессе ее проходки, не оказала влияния на приконтурный массив большеобъемной выработки, тем самым предотвращая рост нагрузки на крепь и обеспечивая ее устойчивость.

### **Заключение**

Многолетние исследования напряженно-деформированного состояния низкопрочного массива трещиноватых скальных горных пород месторождения показывают необходимость постоянно отслеживать современную геодинамику для повышения безопасности работ и снижения проявления аварийных ситуаций, связанных с устойчивостью массива. Оценка устойчивости массива горных пород, необходимая для обеспечения проектных работ, проводится на основе апробированных методик оценки геомеханических характеристик массива, в полной мере не учитывающих физико-механические свойства и напряженно-деформированное состояние массивов скальных горных пород, которое неразрывно связано с пространственным и временным масштабами породных объемов, вмещающих объекты недоразпользования.

Обеспечение требований безопасности необходимо учитывать при проек-

тировании подземных горных выработок и в дальнейшем, при строительстве. При этом размеры зоны неупругого деформирования должны учитываться с учетом особенностей месторождения, после проведения дополнительных исследований. Оценка устойчивости массива горных пород на стадии эксплуатации месторождения проводится по данным разведки и ежедневного мониторинга пород в горных выработках инженерно-техническими работниками рудника, совместно с геотехнической, маркшейдерской и геологической службами рудника. Однако, силами предприятия затруднительно решить сложную задачу устойчивости производственного цикла.

Научное сопровождение ведения подземных горных работ позволяет учесть особенности строения месторождения и свойства массива для обеспечения безаварийности горных работ. Настоящими

исследованиями установлены неупругие деформации в зоне влияния выработки исследуемого низкопрочного массива, которые достигают более значительных размеров, распространяясь на 3–7 радиусов от центра выработки. Эти данные не соответствуют ранее установленным закономерностям процесса деформирования в скальном сильно трещиноватом массиве IV–V категории устойчивости. Данные исследования могут быть успешно применены для разработки технологического регламента [20]. Учитывая современные тенденции, полученные данные возможно применить при оценке рисков эксплуатации месторождения [21]. Указанные выше мероприятия обеспечивают безаварийное ведение горных работ при проходке камерных капитальных выработок большого объема и сближенных выработок в сложных горно-геологических условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сентябов С. В.* Геомеханические аспекты формирования природных напряжений в бетонной крепи шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 199–207. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207.

2. *Саммаль А. С., Грибанов В. Б., Капунова Н. А.* Оценка напряженного состояния массива пород в окрестности двух параллельных круговых выработок, сооружаемых в общей зоне укрепления // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – № 3. – С. 323–331.

3. *Ларионов Р. И.* Исследование формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг двух параллельно проведенных тоннелей // Записки Горного института. – 2007. – Т. 172. – С. 78–81.

4. *Еременко В. А., Лушников В. Н., Сэнди М., Милкин Д. А., Мильшин Е. А.* Основание и выбор технологии проведения и способов крепления горных выработок в неустойчивых горных породах на глубоких горизонтах Холбинского рудника // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 59–66.

5. *Протосеня А. Г., Беляков Н. А., Куранов А. Д.* Метод прогноза напряженного состояния комплекса тоннельных выработок сложной пространственной конфигурации с учетом взаимного влияния и последовательности строительства // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 17–24.

6. *Deev P., Sammal A., Antziferov S.* Evaluation of mine support stress state on base of convergence measurement data / 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. 2017, vol. 17, book 13, pp. 321–326. DOI: 10.5593/sgem2017/13/S03.041.

7. *Islavath S. R., Deb D., Kumar H.* Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach // International

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 127, pp. 204–221. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104221.

8. *Elrawy W. R., Abdelhaffez G. S., Saleem H. A.* Stability assessment of underground openings using different rock support systems // Rudarsko-Geolosko-Naftni-Zbornik. 2020, vol. 35, no. 1, pp. 49–64. DOI: 10.17794/rgn.2020.1.5.

9. *Qi F., Ma Z.* Investigation of the roof presplitting and rock mass filling approach on controlling large deformations and coal bumps in deep high-stress roadways // Latin American Journal of Solids and Structures. 2019, vol. 16, no. 4, pp. 24. DOI: 10.1590/1679-78255586.

10. *Zhengzheng Xie, Nong Zhang, Xiaowei Feng, Dongxu Liang, Qun Wei, Mingyue Weng* Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, vol. 123, article 104122. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104122.

11. *Черданцев Н. В.* Устойчивость анизотропного массива горных пород с системой двух спаренных выработок квадратного поперечного сечения // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — № 3. — С. 6–13.

12. *Protosenya A. G., Karasev M. A., Belyakov N. A.* Numerical simulation of rock mass limit state using Stavrogin's strength criterion // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 31–37. DOI: 10.1134/S1062739116010125.

13. *Захаров В. Н., Федоров Е. В., Еременко В. А., Лагутин Д. В.* Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли на Илецком месторождении // Горный журнал. — 2018. — № 2. — С. 41–47.

14. *Серяков В. М.* Геомеханическая оценка технологий поэтапной отработки и крепления поперечных сечений протяженных выработок // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 2. — С. 124–128.

15. *Баловцев С. В., Шевчук Р. В.* Геомеханический мониторинг шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 8. — С. 77–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-77-83.

16. *Viti C., Collettini C., Tesei T., Tarling M. S., Smith S. A. F.* Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites // Minerals. 2018, vol. 8, no. 6, article 241. DOI: 10.3390/min8060241.

17. *Балек А. Е., Ефремов Е. Ю.* Исследование напряженно-деформированного состояния сопряжения ствола с околоствольными выработками маркшейдерскими методами // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2019. — № 2. — С. 267–279.

18. *Сашурин А. Д., Панжин А. А.* Современные проблемы и задачи геомеханики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 188–198. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198.

19. *Балек А. Е., Озорнин И. Л., Каюмова А. Н.* Совместные замеры напряженного состояния и модуля упругости породного массива при проходке шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 21–36. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-21-36.

20. *Харисов Т. Ф., Балек А. Е., Озорнин И. Л.* Обоснование регламента проходки параллельных взаимовлияющих выработок в напряженных трещиноватых скальных массивах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 10. — С. 71–79.

21. *Овчинникова Т. И., Потоцкий Е. П., Фирсова В. М.* Риск-ориентированный подход при оценке опасностей в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 199–208. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208. **PLAB**

## REFERENCES

1. Sentyabov S. V. Geomechanical aspects of formation of natural stresses in a concrete mount of a shaft. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 199–207. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207.
2. Sammal' A. S., Gribanov V. B., Kapunova N. A. Stress state estimation of the rock massif in the vicinity of two parallel circular openings to be erected in the common area strengthen. *Izvestiya Tula State University. Natural sciences.* 2013, no. 3, pp. 323–331. [In Russ].
3. Larionov R. I. Investigation of the stress-strain state formation of a massif of rocks around two parallel tunnels. *Journal of Mining Institute.* 2007, vol. 172, pp. 78–81. [In Russ].
4. Eremenko V. A., Lushnikov V. N., Sendi M., Milkin D. A., Mil'shin E. A. Selection and basis of mine working driving and excavation support in unstable rocks at deep levels of Kholbinsky Mine. *Gornyi Zhurnal.* 2013, no. 7, pp. 59–66. [In Russ].
5. Protosenya A. G., Belyakov N. A., Kuranov A. D. The prediction technics of tunnel sets with complex three dimensional configuration stress state with allowance for relative influence and building sequence. *Journal of Mining Institute.* 2012, vol. 199, pp. 17–24. [In Russ].
6. Deev P., Sammal A., Antziferov S. Evaluation of mine support stress state on base of convergence measurement data. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017.* 2017, vol. 17, book 13, pp. 321–326. DOI: 10.5593/sgem2017/13/S03.041.
7. Islavath S. R., Deb D., Kumar H. Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2020, vol. 127, pp. 204–221. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104221.
8. Elrawy W. R., Abdelhaffez G. S., Saleem H. A. Stability assessment of underground openings using different rock support systems. *Rudarsko-Geolosko-Naftni-Zbornik.* 2020, vol. 35, no. 1, pp. 49–64. DOI: 10.17794/rgn.2020.1.5.
9. Qi F., Ma Z. Investigation of the roof presplitting and rock mass filling approach on controlling large deformations and coal bumps in deep high-stress roadways. *Latin American Journal of Solids and Structures.* 2019, vol. 16, no. 4, pp. 24. DOI: 10.1590/1679-78255586.
10. Zhengzheng Xie, Nong Zhang, Xiaowei Feng, Dongxu Liang, Qun Wei, Mingyue Weng. Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2019, vol. 123, article 104122. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104122.
11. Cherdancev N. V. Stability of anisotropic rock massif with two adjacent square cross-section openings system. *Industrial safety.* 2016, no. 3, pp. 6–13. [In Russ].
12. Protosenya A. G., Karasev M. A., Belyakov N. A. Numerical simulation of rock mass limit state using Stavrogin's strength criterion. *Journal of Mining Science.* 2015, vol. 51, no. 1, pp. 31–37. DOI: 10.1134/S1062739116010125.
13. Zakharov V. N., Eremenko V. A., Fedorov E. V., Lagutin D. V. Geomechanical support of mine planning and design in the Iletsk rock salt field. *Gornyi Zhurnal.* 2018, no. 2, pp. 41–47. [In Russ].
14. Seryakov V. M. Geomechanical assessment of technologies of stage-by-stage mining and fastening of cross sections of extended mine workings. *Mining sciences: fundamental and applied issues.* 2018, vol. 5, no. 2, pp. 124–128. [In Russ].
15. Balovtsev S. V., Shevchuk R. V. Geomechanical monitoring of mine shafts in difficult ground conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 8, pp. 77–83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-77-83.
16. Viti C., Colletini C., Tesi T., Tarling M. S., Smith S. A. F. Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites. *Minerals.* 2018, vol. 8, no. 6, article 241. DOI: 10.3390/min8060241.



17. Balek A. E., Efremov E. Yu. The study of the stress and strain state of the conjugation of the shaft with the adjoining mine workings by surveying methods. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2019, no. 2, pp. 267 – 279. [In Russ].

18. Sashurin A. D., Panzhin A. A. Current problems and objectives in geomechanics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 188 – 198. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198.

19. Balek A. E., Ozornin I. L., Kayumova A. N. Joint analysis of rock mass stress state and elasticity modulus during shaft sinking. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 21 – 36. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-21-36.

20. Kharisov, T.F., Balek, A.E., Ozornin, I.L Justification of regulations for driving parallel mutually influencing mine workings in stressed cracked rocky massifs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 10, pp. 71 – 79. [In Russ].

21. Ovchinnikova T. I., Pototskiy E. P., Firsova V. M. Risk-based approach to hazard assessment in the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 199 – 208. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каюмова Альфия Наилевна<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник,  
доцент НИТУ «МИСиС», e-mail: alfkaa@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-6064-4743,

Балек Александр Евгеньевич<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: balek@igduran.ru,  
ORCID ID: 0000-000230407-2450,

Харисов Тимур Фаритович<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: timur-ne@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-4668-081X,

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения РАН,  
**Для контактов:** Каюмова А.Н., e-mail: alfkaa@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.N. Kayumova<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher, e-mail: alfkaa@mail.ru,  
Assistant Professor, National University of Science  
and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia,  
ORCID ID: 0000-0002-6064-4743,

A.E. Balek<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher,  
e-mail: timur-ne@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-000230407-2450,

T.F. Kharisov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher, e-mail: timur-ne@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-4668-081X,

<sup>1</sup> Institute of Mining of Ural Branch,  
Russian Academy of Sciences, 620075, Ekaterinburg, Russia.

**Corresponding author:** A.N. Kayumova, e-mail: alfkaa@mail.ru.

Получена редакцией 30.03.2022; получена после рецензии 11.05.2022; принята к печати 10.06.2022.

Received by the editors 30.03.2022; received after the review 11.05.2022; accepted for printing 10.06.2022.