

ВЫЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

А. Е. Балек¹, Т. Ф. Харисов¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: Статья посвящена актуальной фундаментальной и прикладной задаче по выявлению межблоковых границ и оценке их геодинамической активности в процессе ведения горных работ. Базовым объектом натурных исследований является рудопородный массив Кемпирсайских хромитовых месторождений, отрабатываемых шахтой «10-летие независимости Казахстана». Для выявления геодинамической активности междублоковых границ вмещающего породного массива были проанализированы замеры фактических радиусов стволов «Вентиляционный», «Клетевой» и «Скиповой» в процессе их проходки. На основании анализа результатов замеров выделены границы блоков по пиковым превышениям проектных радиусов исследуемых стволов. Представлен новый критерий самоорганизации подвижных блоков, определяющих риск возникновения аварийных ситуаций в подземных выработках. При пересечении забоем выработки потенциально опасной границы между подвижными блоковыми структурами происходит резкое ухудшение устойчивости призабойного породного массива, отражаемое скачкообразным увеличением размеров выработки вчерне, с последующим более постепенным их приближением к проектным. Степень геодинамической активности пересекаемой междублоковой границы характеризует отношение градиента скачкообразного увеличения размеров выработки к градиенту их последующего приближения к проектным размерам.

Ключевые слова: горный массив, иерархическая блочность, геодинамические движения, напряжения, деформации, вертикальные стволы, проходка, шахта.

Благодарность: Работа выполнена в ходе реализации государственного задания № 075–00581–19–00, тема № 0405–2019–0007.

Для цитирования: Балек А. Е., Харисов Т. Ф. Выявление геодинамически активных блоковых структур в массивах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–2. – С. 30–41. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_30.

Identification of geodynamically active blocks structures in rock masses

A. E. Balek¹, T. F. Kharisov¹

¹ Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The article addresses the relevant fundamental and applied problem connected with identification of interblock boundaries and assessment of their geodynamic activity during mining operations. The key subject of the field studies is Kempirsay Massif hosting chromite ore bodies now under extraction by 10 Years of Independence of Kazakhstan mine. To reveal

geodynamic activity of interblock boundaries of the host rock mass, the measurements of the actual radii of Ventilation, Cage Hoist and Skip Hoist shafts during their sinking were analyzed. Based on the analysis of the measurements, the interblock boundaries were identified based on peak excesses of the radii in the test shafts over their design values. The paper presents a new criterion of self-organization of mobile blocks, which govern the risk of emergency situations in underground excavations. When the shaft foot intersects a potentially hazardous boundary between mobile blocks, stability of the bottom-hole rock mass drops, which is reflected by jumps in the rough shaft size which later on approaches gradually the design size. The degree of geodynamic activity of the intersected interblock boundary is characterized by the ratio between the gradient of jump-like increase in the shaft size and the gradient of subsequent approach to the design size.

Key words: rock mass, hierarchy of blocks, geodynamic movements, stresses, strains, vertical shafts, sinking, mine.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of State Contract No. 075-00581-19-00, Topic No. 0405-2019-0007.

For citation: Balek A. E., Kharisov T. F. Identification of geodynamically active blocks structures in rock masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):30–41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_30.

Введение

Эффективность и безопасность строительства подземных сооружений объектов недропользования в значительной степени зависят от качества прогнозной оценки горно-геологических и геомеханических условий массива горных пород, характеризующихся наличием совокупности структурных элементов, именуемых блоками, параметры которых варьируются в зависимости от рассматриваемого иерархического уровня. Важной характеристикой межблоковых границ является их геодинамическая активность, определяющаяся количественными показателями взаимных перемещений структурных блоков в пространстве и во времени.

Проявление геодинамической активности породного массива, вмещающего объекты недропользования, влечет за собой снижение устойчивости системы «крепь-массив» в процессе строительства и эксплуатации подземных выработок, которое проявляется в виде потери устойчивости и нарушения возведенной крепи. Выявление межблоковых границ и их качествен-

ная и количественная оценка являются актуальной фундаментальной и прикладной задачей в горной науке, её решение позволяет больше понять о механике деформирования массива и в последующем учесть полученные результаты при ведении горных работ.

Данный вопрос поднимался в горной науке достаточно давно. Различные авторы в своих исследованиях ранжируют границы структурных блоков (разломы) по степени активности на разных масштабных иерархических уровнях, учитывая геолого-морфологические аспекты [1], комплекс сейсмологических данных [2], анализом аэрофотоснимков, спутниковой, геодезической GPS съемки [3, 4], а также обработкой геофизических измерений [5].

Такие исследователи, как Ю. О. Кузьмин, А. А. Панжин и Ю. П. Коновалова, диагностируют межблоковые границы и геодинамическую активность массива, которая проявляется как в виде медленных криповых подвижек по границам структурных блоков, так и в виде короткопериодных знакопеременных движений в пределах масштаб-

ного уровня 500 — 5000 м. Измерения осуществляются в виде непрерывного мониторинга комплексами спутниковой геодезии за системой реперных пунктов в течение нескольких часов или даже суток [6 — 12].

Т. Ш. Далатказин в своих исследованиях выполняет структурно-геодинамическое картирование исследуемого участка, применяя метод радонометрии с последующим расчетом индекса геодинамической активности на выявленных границах структурных блоков в пределах масштабного уровня 100 — 5000 м [13].

В решении данной задачи также используются геофизические методы, где на основании интенсивности изменений электрофизических параметров устанавливаются критерии активности трещиноватых разломных структур.

Приведенные подходы, несомненно, являются эффективными для исследования геодинамической активности блоков массива масштабного уровня в несколько сотен метров, но лишь непосредственно с дневной поверхности. Применение их в ограниченном выработанном пространстве (горные выработки) не представляется возможным.

Методика В. Б. Писецкого с применением сейсмического метода, где на основе зарегистрированных сигналов осуществляется оценка структуры и относительных значений параметров напряженно-деформированного состояния массива на расстояниях от нескольких метров до сотен метров в условиях подземных выработок, основывается на представлении массива дискретной средой с блоковой организацией, протекающей в ней под воздействием естественных и техногенных геодинамических процессов [14]. Однако данная методика не позволяет количественно охарактеризовать степень геодинамической активности блоков.

Методы исследований

Авторами для выявления в массивах скальных горных пород геодинамически активных междублоковых границ предложено использовать результаты замеров вывалообразований, смещений и других видимых нарушений контура поперечного сечения горных выработок вчерне, фиксируемых в процессе их проходки [15, 16].

Известно, что при приближении забоя выработки к границе между крупномасштабными (размерами в десятки — сотни метров) породными блоками, оконтуриваемыми зонами повышенной трещиноватости, происходит ухудшение устойчивости призабойного породного массива. Затем, по мере удаления забоя от междублоковой границы, с тем же темпом происходит увеличение устойчивости массива.

Представляется вполне очевидным, что при пересечении забоем выработки «активной» границы между подвижными блоковыми структурами ухудшение устойчивости призабойного породного массива будет происходить быстрее, чем при пересечении «пассивной» границы между блоками неподвижными. Это отразится в скачкообразном увеличении размеров выработки вчерне. При последующем же удалении забоя от «активной» границы их приближение к проектным **размерам** будет происходить медленнее, чем при удалении от границы «пассивной», вследствие влияния блоковых подвижек, провоцируемых проходкой выработки. Соответственно, коэффициент геодинамической активности пересекаемой междублоковой границы может быть охарактеризован отношением градиента скачкообразного увеличения размеров выработки к градиенту их последующего приближения к проектным.

Наиболее наглядно данный критерий самоорганизации крупномасштабных

подвижных блоковых структур проявляется при проходке вертикальных стволов как по причине их больших размеров, так и вследствие меньшего влияния случайных породных вывалов, происходящих под воздействием силы тяжести, чем в выработках горизонтальных. Кроме того, при проходке шахтных стволов детальные замеры породного контура предусмотрены нормативными документами, а их результаты подлежат архивированию.

В соответствии с требованиями инструкции по производству маркшейдерских работ для оперативного контроля процесса проходки вертикальных стволов замеры контура их поперечного сечения вчерне регулярно выполняются маркшейдерскими службами горнопроходческих предприятий. Профили породных стенок строящегося ствола с точностью до сантиметра замеряются от центрального или боковых отвесов по восьми радиусам через 45° с шагом, кратным проходческим циклам, но не более чем через 8 м. Результаты замеров фиксируются в специальном журнале, который хранится в архиве предприятия и доступен для ретроспективного анализа.

Результаты исследований

В качестве базового объекта натуральных исследований использовали рудопородный массив Кемпирсайских хромитовых месторождений, обрабатываемых шахтой «10-летие независимости Казахстана». Выбор объекта обусловлен его благоприятными условиями для изучения процессов разрушения и подвижек породных блоков вследствие сочетания сравнительно высоких тектонических напряжений с низкими прочностью и модулем упругости скального породного и рудного массива шахты.

Вмещающий породный массив вскрывающих горных выработок шахты в основном представлен трещиноватыми габбро-амфиболитами и ультраосновными серпентинизированными породами: дунитами, перидотитами, пироксеновыми дунитами. Физико-механические свойства пород в образцах:

- предел прочности на одноосное сжатие $[\sigma]_{\text{сж}} = - 45 \div - 90$ МПа;
- на одноосное растяжение $[\sigma]_{\text{раст}} = 5 \div 9$ МПа;
- характер разрушения – хрупкий;
- статический модуль упругости $E = 35 \div 40$ ГПа;
- статический коэффициент Пуассона $\mu = 0,25 \div 0,30$.

Несмотря на достаточно высокий предел прочности пород, слагающих исследуемый массив, он характеризуется низкой устойчивостью в пределах IV – V категории в соответствии с классификациями З. Бенявского, Д. Лобшира, Н. Бартон и др. [17–19]. Основным фактором, оказывающим столь негативное воздействие на устойчивость вмещающего массива, является наличие многочисленных хаотично направленных систем трещин и разноориентированных тектонических нарушений, разбивающих массив на разномасштабные структурные блоки. Блоки с линейными размерами менее 0,1 – 0,5 м оконтурены трещинами преимущественно закрытыми или залеченными прочным заполнителем, а блоки размерами порядка 1–1,5 м и больше, особенно в серпентинизированных породах, оконтурены трещинами с милонитовым или серпофитовым тальковидными заполнителями, которые при увлажнении становятся мыльными на ощупь, что приводит к значительному снижению междублоковой связи. Соответственно, оказываются слабыми и связи между круп-

номасштабными породными блоками, размерами в десятки и сотни метров, которые оконтуриваются зонами повышенной трещиноватости.

В ходе исследования проанализированы данные журналов проходки трех вскрывающих (диаметр в свету $R = 8$ м) вертикальных стволов шахты: Вентиляционного, Скипового и Клетевого, в процессе строительства которых происходили нарушения постоянной крепи, связанные с горизонтальными подвижками вмещающего породного массива.

Проходка стволов Вентиляционный и Скиповой 2-й очереди шахты осуществлялась в схожих горно-геологических и геомеханических условиях, так как расстояние между ними составляет около 120 м. До глубины 900 – 1050 м их проходка велась в сравнительно устойчивом и однородном трещиноватом габбро-амфиболитовом массиве, а глубже — в неустойчивом напряженном массиве серпентинезированных пород.

Строительство ствола Клетевого, относящегося к центральной группе стволов и отстоящего от стволов 2-й очереди на 3,5 км, проходило в качественно иных условиях. На всем протяжении ствола проходка велась в трещиноватом неустойчивом массиве серпентинезированных пород при существенно более высокой геодинамической активности и, соответственно, напряженном состоянии вмещающего породного массива, чем в стволах Скиповой и Вентиляционный [20, 21].

При проходке ствола Вентиляционный в 2015 г. на глубине около 950 м на границе габбрового и серпентинитового массивов произошли нарушения двух колец тубинговой крепи: разрывы чугунных полок, трещинообразование в спинках и ребрах тубингов,

сопровожаемое изгибами монтажных балок — расстрелов, и формирование эллипсоидности тубинговых колец с максимальным суммарным отклонением $\Delta R = 187$ мм. Замеры положения стенок ствола относительно центрального отвеса показали, что нарушения крепи произошли вследствие взаимных срезающих подвижек двух крупномасштабных блоковых структур вмещающего породного массива, наклонно пересекающих ствол, которые привели к смещению его сечения в восточном направлении на 50 мм [22].

При проходке ствола Скиповой в 2020 г. в интервале глубин 1067 – 1077 м (также вблизи границы между габбровым и серпентинитовым массивами) в трех кольцах монолитной бетонной крепи высотой 6 м, наблюдались выколы бетона и формирование наклонно секущих трещин с раскрытием до 3 мм. При этом ниже, на призабойном участке высотой 6 м, в ортогональном к нарушениям бетонной крепи направлении по изгибам временной крепи из колец СВП была зафиксирована подвижка породной стенки ствола на 400 мм.

Судя по косвенным данным, с горизонтальными подвижками крупных блоковых структур вмещающего породного массива связаны и нарушения бетонной крепи Клетевого ствола. На этом стволе в 1984 г. при проходке в относительно однородном серпентинитовом массиве уходками по 3 – 4 м в интервале глубин 572 – 765 м произошло аварийное разрушение 193-метрового участка монолитной бетонной крепи. Причем произошло оно аномально быстро и неравномерно. После вывала крупного (свыше 20 м³) породного объема из северной призабойной стенки ствола на глубине 765 м и появления в вышележащем бетонном кольце первых трещин и выколов бетона началось интен-

сивное разрушение участка крепи, находящегося на 30 м выше, на глубине 727 — 730 м, а также трещинообразования в северо-восточной стенке ствола в интервале глубин 737 — 743 м. Затем в течение последующих двух суток произошло лавинообразное разрушение 193-метрового участка бетонной крепи [23].

Для выявления геодинамической активности междублоковых границ вмещающего породного массива были проанализированы замеры превышений проектных радиусов вышеперечисленных стволов в проходке. На стволах Вентиляционный и Клетевой замеры выполнялись с шагом 8 м (при уходках по 3 — 4 м), а на стволе Скиповой — 3 м (при уходках по 6 м). Результаты замеров, усредненные по периметрам поперечных сечений стволов, представлены на рис. 1—3 в форме точечных диаграмм. Там же отмечены глубины, на которых происходили нарушения крепи, и границы крупномасштабных блоковых структур, выделяемых по пиковым превышениям проектных радиусов.

Обсуждение результатов

Анализ точечных диаграмм свидетельствует о возможности выделения в массивах скальных горных пород в различных геомеханических и технологических условиях «активных» междублоковых границ, не выделяемых геолого-морфологическими методами.

В стволе Вентиляционный произошедшие на глубине 950 м подвижки крупномасштабных блоковых структур, наклонно пересекающих ствол и приведших к смещению его сечения на 50 мм, совпали со скачкообразным (за 8 — 9 уходов) ростом и последующим в 3 раза более постепенным (свыше 24 уходов) приближением усредненного радиуса ствола к про-

ектным значениям (на рис. 1 выделено пунктиром). Ранее фиксируемые в процессе проходки пиковые возрастания усредненного радиуса ствола, зачастую совпадающие с выделенными геолого-морфологическими методами тектоническими нарушениями, имели «симметричный» характер возрастания и уменьшения, что свидетельствует о меньшей их геодинамической активности по сравнению с нарушением на глубине 950 м.

Еще более наглядно вследствие увеличенных уходов и меньшего шага замеров данный критерий иллюстрируют результаты замеров в стволе Скиповой (рис. 2). Быстрые возрастания и медленные уменьшения усредненного радиуса ствола начали проявляться с глубины около 450 м. На рис. 2 на это указывают пунктирные линии линейных аппроксимирующих трендов, отражающих существенно более медленные, чем возрастания (в 5—6 и более раз), приближения сглаженных значений усредненного радиуса ствола к проектным. Они свидетельствуют о наличии на глубинах около 470, 600, 660, 730 и 860 м «активных» границ между крупномасштабными (размерами порядка 100 м) подвижными блоковыми структурами. Можно сказать, что при увеличенном масштабе в радиальных направлениях на этом участке внешний контур бетонной крепи ствола приобрел «штуцeroобразную» форму.

Следует отметить, что способ сглаживания замеренных значений радиуса ствола на их линейную аппроксимацию сказывается слабо, поскольку предлагаемый метод заведомо не требует больших коэффициентов аппроксимации. Об этом можно судить по рис. 4, где на точечную диаграмму рис. 2 в интервале глубин 420—1020 м наложены результаты, усредненные не только по периметру ствола, но и по шестиме-

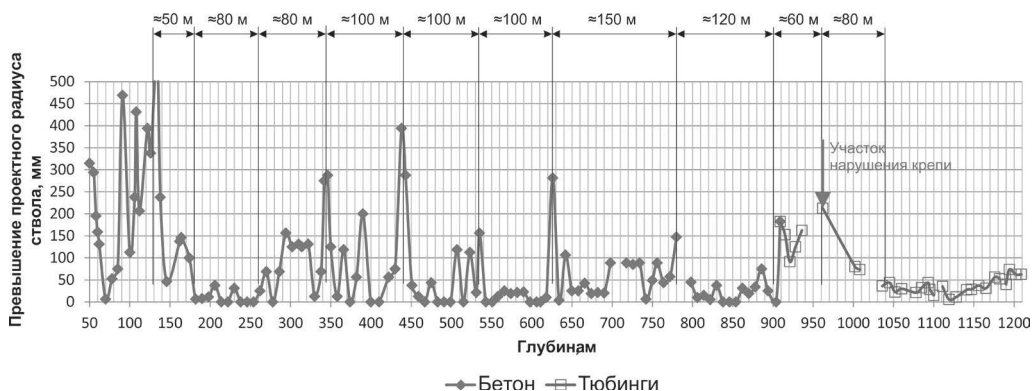


Рис. 1. Результаты замеров превышений проектного радиуса ствола Вентиляционный в процессе проходки

Fig. 1. Measured excesses over the design radius in Ventilation shaft during sinking

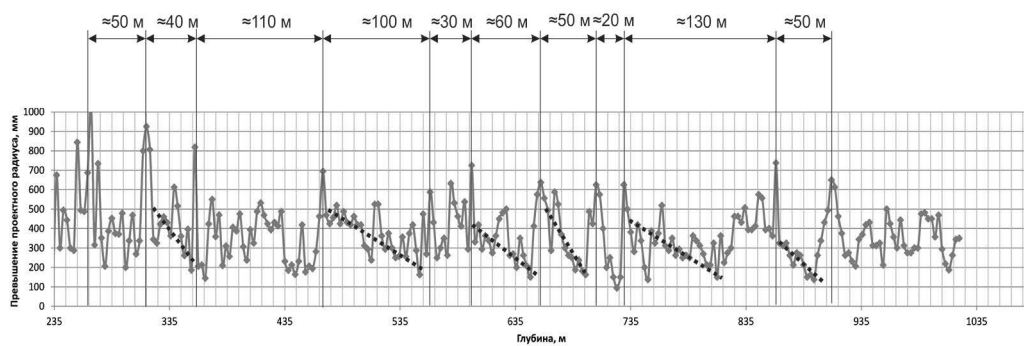


Рис. 2. Результаты замеров превышений проектного радиуса ствола Скиповой в процессе проходки

Fig. 2. Measured excesses over the design radius in Skip Hoist shaft during sinking

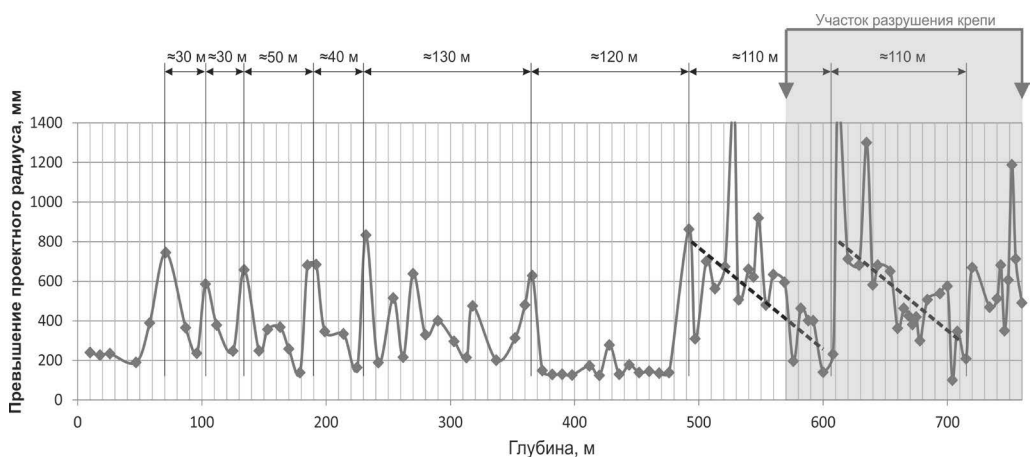


Рис. 3. Результаты замеров превышений проектного радиуса ствола Клетевой в процессе проходки

Fig. 3. Measured excesses over the design radius in Cage Hoist shaft during sinking

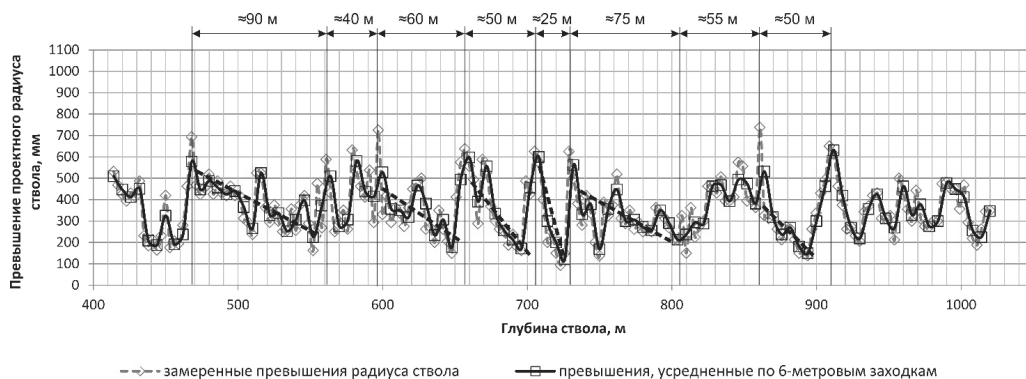


Рис. 4. Результаты замеров превышений проектного радиуса ствола Скиповой, усредненные по его периметру и по шестиметровым заходкам

Fig. 4. Measured excesses over the design radius in Skip Hoist shaft during sinking after averaging over the shaft perimeter and over 6 m overcuts

тровым заходкам. Это позволило сгладить разницу между замерами у забоя и на высоте 3 м, (которые в 85 % уходок были больше, чем у забоя, но в среднем лишь на 28 мм). Однако на выявленные границы геодинамически активных блоковых структур это практически не повлияло. В любом случае линейные размеры подвижных блоковых структур составляли около 50 — 90 м, а размеры слагающих их более мелких породных блоков, выделяемых по «симметричным» пиковым превышениям проектных радиусов, — около 30 м.

Такие же соотношения размеров «активных» и «пассивных» породных блоков прослеживается и по замерам в стволе Клетевой (рис. 3). Выделяются границы между 110, 130-метровыми подвижными структурами с коэффициентом взаимной активности около 5 — 6, которые сформированы из примерно 30-метровых малоподвижных блоковых структур с коэффициентом активности порядка 1.

В этой связи следует отметить, что размеры более крупномасштабных подвижных породных блоков, ранее выявленных по замерам горизонтальных смещений реперных пунктов

на поверхности шахтного поля, в среднем составляли 300 — 500 м [23]. Такое распределение размеров иерархий подвижных блоковых структур, с коэффициентом вложения около трех, хорошо вписывается в современные математические модели процессов самоорганизации (консолидации, вторичного структурирования) деформационного поля массива скальных горных пород, проявляющихся в формировании в нем относительно стабильных блоковых структур, выделяемых по согласованным смещениям слагающих их более мелкомасштабных породных блоков.

Заклучение

По результатам натурных исследований при проходке вертикальных стволов шахт в тектонически напряженных массивах скальных горных пород выявлен новый критерий самоорганизации крупномасштабных (размерами около 100 м) подвижных блоковых структур, определяющих риск возникновения аварийных ситуаций в подземных выработках, отличающийся тем, что:

- при пересечении забоем выработки потенциально опасной границы между подвижными блоковыми структурами происходит сравнительно

быстрое ухудшение устойчивости призабойного породного массива, отражаемое скачкообразным увеличением размеров выработки вчерне, с последующим в несколько раз более постепенным их приближением к проектным;

– степень (коэффициент) геодинамической активности пересекаемой междублоковой границы характеризует отношение градиента скачкообразного увеличения размеров выработки к гра-

диенту их последующего приближения к проектным размерам.

Благодарность

Авторы выражают признательность за конструктивное обсуждение и помощь при проведении экспериментальных и аналитических исследований научным сотрудникам ИГД Уро РАН: А. Д. Сашурину, А. А. Панжину, И. Л. Озорнину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чипизубов А. В.* Классификация активных разломов по степени активности, возрасту, активизации и достоверности / Тектоника океанов и палеоокеанов: тезисы докладов всесоюзного тектонического совещания. – М., 1991. – С. 25–27.

2. *Шерман С. И., Сорокин А. П., Савитский В. А.* Новые методы классификации сейсмоактивных разломов литосферы по индексу сейсмичности // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 401. – 3. – С. 395–398.

3. *Ассиновская Б. А., Горшков В. П., Щербакова Н. В., Панас Н. М.* Активные разломы, выявленные по данным геодинамических наблюдений в Балтийском море // Инженерные изыскания. – 2013. – 2. – С. 50–55.

4. *Баранов Б. В., Гедике К., Фрейтаг Р., Дозорова К. А.* Активные разломы юго-восточной части камчатского полуострова и командорская зона сдвига // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2010. – № 2 (16). – С. 66–77.

5. *Неведрова Н. Н., Санчаа А. М., Шалагинов А. Е., Пономарев П. В., Рохина М. Г.* Характеристика активности разломных структур по данным геоэлектрики с контролируемыми источниками (на примере Горного Алтая) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 12. – С. 243–259.


6. *Панжин А. А., Панжина Н. А.* Исследование короткопериодной геодинамики массива горных пород Качканарского горно-обогатительного комбината // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. – С. 318–329.

7. *Panzhin A.* Identification of geodynamic movements based on the results of geodetic monitoring measurements // E3S WEB OF CONFERENCES. VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources” (PCDG 2020). – 2020. – С. 04001. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204001.

8. *Коновалова Ю. П., Ручкин В. И.* Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3–1. – С. 90–104. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–31–0-90–104.

9. *Kuzmin Yu. O.* Recent geodynamics of dangerous faults. // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* – 2016. – Т.52. – №5. – С. 709–722. DOI: 10.1134/S1069351316050074.

10. *He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X.* Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering // *Advances in Space Research.* – 2015. – Vol. 55, Issue 5. March. – С. 1316–1327.

11. Yan Bao, Wen Guo, Guoquan Wang et al. Millimeter-Accuracy Structural Deformation Monitoring Using Stand-Alone GPS // *Journal of Surveying Engineering*. – 2017. – Vol. 144.
12. Yigit C. O., Coskun M. Z. Yavasoglu H. et al. The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: A case study // *Measurement*. – 2016. – Vol. 91. – С. 398–404.
13. Далатказин Т. Ш., Зуев П. И. Исследования геодинамической ситуации прибортовых участков с использованием радонометрии при открытом способе разработки месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 3–1. – С. 46–55.
14. Лапин С. Э., Писецкий В. Б., Патрушев Ю. В., Чевдарь С. М. Результаты технологического применения сейсмического метода дистанционной оценки риска потери прочности горного массива в процессе ведения подземных горных работ: сб. науч. ст. Сейсмические технологии-2016 – 2016. – С. 119–121.
15. 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.
16. J. Wang, E. Li, L. Chen, Y. Han, C. Wang Measurement and analysis of the internal displacement and spatial effect due to tunnel excavation in hard rock // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2019. – V. 84. – С. 151–165.
17. Laubscher D. H. and Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses, In *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies* (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullok) // *Society of Mining Metallurgy and Exploration, SME*, – 2001. – С. 475–481.
18. Avinash P., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines – A modified RMR approach // *Current Science*. – 2018. – Vol. 114. – No. 10. –С. 2167–2174.
19. Meshram V. M., Dahale P. P., Tiwari M. S., Ramteke S. B. Advancement of support system for underground drift excavation – a review // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. –2018. – Vol. 9. – No 6. – С. 332–339.
20. Sashurin A. D., Panzhin A. A., Kharisov T. F., Knyazev D. Yu. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins // *Eurasian Mining*. – 2016. – № 2. – С. 3–5.
21. Харисов Т. Ф., Антонов В. А. Исследование деформации горных пород в процессе проходки вертикального ствола // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – № 3. – С. 146–150.
22. Озорнин И. Л., Балек А. Е., Каюмова А. Н. Формирования нагрузок на крепь шахтных стволов в иерархически блочной среде под влиянием современных геодинамических движений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020.– № 3–1.– С 173–181 ISSN 0236–1493. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–31–0-173–181.
23. Боликов В. Е., Тиль В. В., Зайцев Ю. Г. Геомеханические проблемы при проходке и креплении капитальных горных выработок на шахте Центральная // *Горный журнал*. – 1998.– № 6. – С. 15–17. 

REFERENCES

1. Chipizubov A. V. *Klassifikaciya aktivnyh razlomov po stepeni aktivnosti, vozrastu, aktivizacii i dostovernosti* [Classification of active faults according to the degree of activity,

age, activation and reliability]. Tektonika okeanov i paleookeanov: tezisy dokladov vsesoyuznogo tektonicheskogo soveshchaniya. Moscow, 1991, pp. 25 – 27. [In Russ].

2. Sherman S. I. Sorokin A. P., Savitskij V. A. New methods for classifying seismically active lithospheric faults by seismicity index. *Doklady Akademii nauk*. 2005, no. 401, 3, pp. 395 – 398. [In Russ].

3. Assinovskaya B. A., Gorshkov V. P., Shcherbakova N. V., Panas N. M. Active faults identified by geodynamic observations in the Baltic Sea, *Inzhenernye izyskaniya*. 2013, no. 2, pp. 50 – 55. [In Russ].

4. Baranov B. V., Gedike K., Frejtag R., Dozorova K. A. Active faults in the southeastern part of the Kamchatka Peninsula and the Komandor shear zone, *Vestnik Kamchatskoj regional'noj organizacii Uchebno-nauchnyj centr. Seriya: Nauki o Zemle*. 2010, no. 2 (16), pp. 66 – 77. [In Russ].

5. Nevedrova N. N., Sanchaa A. M., Shalaginov A. E., Ponomarev P. V., Rohina M. G. Characterization of activity of fault structures according to geoelectric data with controlled sources (on the example of the Altai Mountains), *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 12, pp. 243 – 259. [In Russ].

6. Panzhin A. A., Panzhina N. A. Study of short-period geodynamics of the rock massif of the Kachkanarsky mining and processing plant, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2020, no. 2, pp. 318 – 329. [In Russ].

7. Panzhin A. Identification of geodynamic movements based on the results of geodetic monitoring measurements. E3S WEB OF CONFERENCES. VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources” (PCDG 2020). 2020. C. 04001. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204001.

8. Konovalova Yu. P., Ruchkin V. I Assessment of the influence of short-period geodynamic movements on the stress-strain state of the rock massif, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3 – 1, pp. 90 – 104. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2020 – 31 – 0-90 – 104. [In Russ].

9. Kuzmin Yu. O. Recent geodynamics of dangerous faults, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2016. Vol.52, no. 5, pp. 709 – 722. DOI: 10.1134/S1069351316050074.

10. He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering. *Advances in Space Research*. 2015, Vol. 55, Issue 5. March. pp. 1316 – 1327.

11. Yan Bao, Wen Guo, Guoquan Wang et al. Millimeter-Accuracy Structural Deformation Monitoring Using Stand-Alone GPS, *Journal of Surveying Engineering*. 2017, Vol. 144.

12. Yigit C. O., Coskun M. Z. Yavasoglu H. et al. The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: A case study, *Measurement*. 2016, Vol. 91, pp. 398 – 404.

13. Dalatkazin T. Sh., Zuev P. I. Studies of the geodynamic situation of instrumental sites using radonometry in open-pit mining, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3 – 1. pp. 46 – 55. [In Russ].

14. Lapin S. E., Piseckij V. B., Patrushev Yu. V., Chevdar' S. M. *Rezul'taty tekhnologicheskogo primeneniya sejsmicheskogo metoda distancionnoj ocenki riska poteri prochnosti gornogo massiva v processe vedeniya podzemnyh gornyh rabot* [Results of technological application of seismic method of remote risk assessment of rock mass strength loss during underground mining]. sb. nauch. st. Sejsmicheskie tekhnologii-2016. 2016, pp. 119 – 121. [In Russ].

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

16. J. Wang, E. Li, L. Chen, Y. Han, C. Wang Measurement and analysis of the internal displacement and spatial effect due to tunnel excavation in hard rock, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, Vol. 84, pp. 151–165.

17. Laubscher D. H. and Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses, In *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies* (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullock), Society of Mining Metallurgy and Exploration, SME. 2001, pp. 475–481.

18. Avinash P., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines A modified RMR approach, *Current Science*. 2018, Vol. 114, no. 10, pp. 2167–2174.

19. Meshram V. M., Dahale P. P., Tiwari M. S., Ramteke S. B. Advancement of support system for underground drift excavation a review, *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018, Vol. 9, no. 6, pp. 332–339.

20. Sashurin A. D., Panzhin A. A., KHarisov T. F., Knyazev D. Yu. Innovative approaches to rock mass stability in mining high-grade quartz veins, *Eurasian Mining*. 2016, no. 2, pp. 3–5.

21. KHarisov T. F., Antonov V. A. Study of rock deformation during vertical shaft sinking, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 3, pp. 146–150. [In Russ].

22. Ozornin I. L., Balek A. E., Kayumova A. N. Formation of loads on the shaft supports in a hierarchical block environment under the influence of modern geodynamic movements, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3–1, pp. 173–181. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–31–0-173–181. [In Russ].

23. Bolikov V. E., Til' V. V., Zajcev Yu. G. Geomechanical problems during tunneling and anchoring of capital mine workings in the Tsentralnaya mine, *Gornyj zhurnal*. 1998, no. 6, pp. 15–17. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Балеk Александр Евгеньевич*¹ — докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений, e-mail: balek@igduran.ru;

*Харисов Тимур Фаритович*¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений, e-mail: timur-ne@mail.ru;

¹ Института горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

Balek Alexander Yevgenyevich, PhD, Leading researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, 58, Mamina-Sibiriyaka Street, Ekaterinburg, 620075, Russia. E-mail: balek@igduran.ru

Kharisov Timur Faritovich, PhD, Senior researcher, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, 58, Mamina-Sibiriyaka Street, Ekaterinburg, 620075, Russia. E-mail: timur-ne@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Balek A. E.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of Geomechanics of Underground Structures, e-mail: balek@igduran.ru;

*Kharisov T. F.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Geomechanics of Underground Structures, e-mail: timur-ne@mail.ru;

¹ Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 30.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 15.12.2020; received after the review 30.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

