

Прогноз устойчивости горизонтальных выработок при подземной отработке золоторудных месторождений

Сосновская Е. Л.¹, Авдеев А. Н.¹, Харисов Т. Ф.^{1*}

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: timur-ne@mail.ru

Реферат

Введение. При подземной разработке золоторудных месторождений одна из актуальных проблем – поддержание заданного срока эксплуатации горных выработок. Этот вопрос в основном изучен для массивов с высокими реологическими свойствами (калийных, угольных), где возможно наблюдать длительные смещения приконтурного массива выработок и их крепей. Для массивов золоторудных месторождений, в которых деформации проявляются, по большей части, в форме хрупкого разрушения, затруднен контроль и обеспечение устойчивости капитальных выработок и их крепления. Поэтому прогноз устойчивости выработок долговременного использования является актуальным.

Методики. В процессе исследований использован комплексный подход, включающий анализ научно-технических источников, выявление причин фактического разрушения выработок и износа крепи на базе геолого-маркшейдерской документации и обследования выработок на золотодобывающих рудниках России, конечно-элементное моделирование техногенных напряжений в приконтурном массиве выработок.

Результаты. Установлено, что разрушение выработок в массивах золоторудных месторождений происходит по трем основным причинам – в результате развития процессов сдвижения, влияния горного давления и потери несущей способности крепи из-за ее износа. По результатам исследований разработана методика оценки сроков безопасной эксплуатации капитальных и подготовительных выработок, которую предложено проводить в зависимости от сочетания горно-геологических и горнотехнических факторов, в частности, глубины горных работ, прочностных характеристик, влияния зоны опорного давления очистных выработок, трещиноватости приконтурного массива выработок, обводненности, степени агрессивности подземных вод. Определены ориентировочные сроки износа крепления горизонтальных выработок на рудниках с учетом условий эксплуатации.

Ключевые слова: горизонтальные выработки; устойчивость; золоторудные месторождения; сроки службы; крепление; износ крепления.

Статья подготовлена в рамках Государственного задания № 075-00412-22 ПР. Тема 3 (2022–2024). (FUWE-2022-0003), рег. № 1021062010536-3-1.5.1.

Введение. При разработке подземным способом рудных месторождений, в том числе золота, одна из актуальных проблем – поддержание заданного срока эксплуатации горных выработок. Причем для жильных месторождений, к которым относится большая часть золоторудных, характерно использование подготовительных выработок с изначально небольшим сроком службы в качестве транспортных и вентиляционных долговременного стояния, до нескольких десятков лет [1]. Возникает потребность обеспечить несущую способность крепи на этот период.

Сроки службы подземных выработок и их крепления, в соответствии с современной нормативно-технической документацией, регламентируются СП 69.13330.2016 «Подземные горные выработки». Однако этот документ применим только для выработок, пройденных в массивах с высокими реологическими свойствами. Исследования изменения несущей способности крепления выработок в процессе их эксплуатации достаточно распространены для условий подземной отработки калийных, угольных месторождений [2], где легко наблюдать длительные смещения приконтурного массива горных пород, характеризующие рост нагрузки на крепь. Однако массивы горных пород золоторудных месторождений сложены метаморфическими и магматическими породами, характеризующимися низкими реологическими свойствами, породы и руды склонны к хрупкому разрушению под нагрузкой, поэтому разрушение выработок в процессе их эксплуатации может происходить не только в статических, но и в динамических формах. Основными наблюдаемыми формами разрушения горных выработок на золотодобывающих рудниках являются, прежде всего, интенсивное трещино- и заколообразование в породах устойчивых и средней устойчивости, а также вывалы и отслоения в неустойчивых породах [3, 4]. Дополнительно разработку золоторудных месторождений осложняют развитая тектоника и трещиноватость, усиленный водоприток, особенно на глубоких горизонтах. Высокая степень подработки земной поверхности накопленными подземными пустотами и карьерными разработками способствует снижению устойчивости капитальных горных выработок из-за негативных процессов сдвижения и горного давления. Поэтому оценка сроков службы горных выработок в условиях массивов горных пород с низкими реологическими свойствами является актуальной. Решение этой задачи позволит повысить безопасность и эффективность подземной отработки.

Методики. Авторы проводили многолетние исследования по оценке устойчивости подземных выработок на золоторудных месторождениях Урала, Сибири и Дальнего Востока. Использовался комплексный подход, включающий обзор научно-технической литературы по проблеме оценки сроков службы горных выработок и их крепей; анализ горно-геологических и горнотехнических особенностей разработки золоторудных месторождений, влияющих на устойчивость приконтурного массива горных выработок и их крепления; выявление причин фактического разрушения выработок и износа крепи на базе геолого-маркшейдерской документации рудников и визуального обследования выработок; конечно-элементное моделирование уровня техногенных напряжений в приконтурном массиве горизонтальных выработок.

Результаты. В процессе изучения горно-геологических и горнотехнических особенностей разработки золоторудных месторождений установлено следующее. Во-первых, в массивах золоторудных месторождений наблюдаются осложняющие геологические факторы, неблагоприятные для сохранения устойчивости выработок: тектонические разломы с глиной трения и зеркалами скольжения, характерные для жильных месторождений; участки аномальной тектонической нарушенности, блочной отдельности пород; контакты даек и вмещающих пород, а также участки с усиленным водопритоком в виде капежа и затопленные выработки после осушения. С горнотехнической точки зрения наиболее сложными участками являются сопряжения горных выработок, участки сближенных выработок, а также выработки, попадающие в зону опорного давления и сдвижения от выработанного пространства, особенно при высокой степени подработки. Во-вторых, разрушение выработок в массивах с низкими реологическими и высокими проч-

ностными и упругими свойствами, к которым относятся массивы метаморфизованных пород золоторудных месторождений, в основном происходит в результате развития процессов сдвижения, особенно при накоплении подземных пустот, под влиянием горного давления и из-за потери несущей способности крепи вследствие ее износа.

Влияние процессов сдвижения на устойчивость выработок. В процессе исследований установлено, что для типовых условий выемки золоторудных жил расчетные линейные параметры зоны опасных деформаций в бортах и потолочные очистных выработок составляют от 4 до 6 выемочных мощностей. Проектные углы сдвижения для средних условий отработки золоторудных месторождений находятся в диапазоне 65° – 75° [1]. Для исключения процессов сдвижения капитальные выработки проектируются за пределами зоны опасных деформаций. Однако в процессе эксплуатации рудника существует опасность подрработки капитальных транспортных и вентиляционных выработок [5]. В таком случае, в первую очередь необходимо обеспечить геомеханический мониторинг капитальных выработок, попавших в зону опасных деформаций. При необходимости следует предусмотреть погашение очистных выработок обрушением или закладкой, прекращение доступа в опасные выработки и т. д.

Для учета влияния горного давления на сроки безопасной эксплуатации авторами разработана методика оценки времени устойчивого состояния приконтурного массива капитальных и подготовительных выработок долговременного использования. Известно, что в настоящее время вопросы длительной прочности массивов горных пород, особенно с низкими реологическими свойствами, не имеют достаточного теоретического обоснования и являются актуальной проблемой. Отсутствуют надежные методы учета фактора времени, так как основные методы расчетов напряженно-деформированного состояния, даже основанные на принципах нелинейной механики сред [6] оценивают конечное деформированное состояние конструктивных элементов систем разработки и не позволяют прогнозировать изменение напряженно-деформированного состояния во времени [7]. Поэтому закономерности изменения деформационных характеристик во времени на практике определяются на базе статистической обработки результатов наблюдений за развитием деформаций. В этом случае наиболее перспективными представляются эмпирико-статистические исследования (Н. Г. Ялымов, 1977 г.), в результате которых установлена связь между длительной прочностью и сроками службы подземных геоконструкций [8]. База данных собиралась на рудных месторождениях с низкими реологическими свойствами горных пород и руд крепостью от 5 до 18 во временном диапазоне от 2 до 25 лет. Результаты этих исследований широко используются в настоящее время для анализа устойчивости конструктивных элементов на рудных месторождениях, в частности, золота [3, 9].

При детальном анализе результатов исследований АН Киргизии [8] связь между длительной прочностью, временем эксплуатации выработки и крепостью приконтурного массива пород представилось возможным выразить в виде формулы:

$$t = (1,22f + 1,7)K_t - 1,5, \quad (1)$$

где t – время эксплуатации выработки, лет; f – крепость пород по шкале проф. М. М. Протодяконова; K_t – коэффициент длительной прочности.

В то же время, фактический коэффициент длительной прочности можно выразить как соотношение между прочностью приконтурного массива и уровнем техногенных напряжений в нем:

$$K_t = \frac{\sigma^{об} K_b K_c K_{уп}}{\sigma^к}, \quad (2)$$

где $\sigma^{об}$ – предел прочности горной породы в образце в естественно-сухом состоянии, МПа; K_b – коэффициент размягчаемости, равный отношению пределов прочности обводненной породы и породы естественной влажности; K_c – коэффициент структурного ослабления массива; $K_{уп}$ – коэффициент упрочнения приконтурного массива выработки за счет крепления; $\sigma^к$ – техногенные напряжения в приконтурном массиве капитальных выработок, МПа

Объединив формулы (1) и (2), получаем:

$$t = \left[(1,22f + 1,7) \sigma^{об} \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_{уп} \right] / \sigma^к - 1,5. \quad (3)$$

Техногенные напряжения $\sigma^к$ в формуле (3) предлагается определять из зависимостей, полученных авторами, на основе конечно-элементного моделирования [1]:

– для выработок за пределами зоны опорного давления очистных работ

$$\sigma^к = (0,96 + 1,44K_{б,р}) \gamma H,$$

– для выработок в пределах зоны опорного давления очистных работ

$$\sigma^к = \left[(-0,48 \cdot \ln(D) + 3,7) + (-0,32 \cdot \ln(D) + 2,47) \cdot K_{б,р} \right] \gamma H,$$

где $K_{б,р}$ – коэффициент бокового распора (соотношение первоначальных горизонтальных и вертикальных напряжений); H – глубина горных работ, м; γ – объемный вес горных пород, мН/м³; D – расстояние от выработанного пространства до анализируемой выработки, м.

Коэффициент упрочнения массива зависит от параметров применяемого крепления и уточняется для конкретных условий, по данным технической документации рудника, без крепления, очевидно, $K_{уп} = 1$.

Коэффициент структурного ослабления приконтурного массива можно принять по категории устойчивости приконтурного массива пород: для пород весьма устойчивых – 0,8–1,0; устойчивых – 0,5–0,7; средней устойчивости – 0,3–0,4; неустойчивых – 0,1–0,2 и весьма неустойчивых – 0,1.

Таким образом, сроки устойчивого состояния приконтурного массива капитальных и подготовительных выработок предлагается рассчитывать в зависимости от уровня напряженного состояния, с учетом глубины горных работ, прочности, категории устойчивости пород, обводненности, упрочнения приконтурных пород креплением, а также удаленности от очистных выработок (т. е. влияния опорного давления очистных выработок). При необходимости оперативно уточнить фактическое напряженное состояние приконтурного массива выработок в конкретных условиях можно натурными измерениями.

Износ крепи и потеря ее несущей способности – третий фактор, оказывающий воздействие на устойчивость выработок. В ходе исследований выявлены ключевые параметры, влияющие на износ крепи капитальных выработок в скаль-

ных массивах золоторудных месторождений. Это блочность, трещиноватость приконтурного массива, степень его обводненности, агрессивность и минерализация рудничных вод, приводящие к коррозионному износу и снижению несущей способности крепи [10]. Влияние блочности, трещиноватости и обводненности приконтурного массива традиционно учитывается с помощью категории устойчивости массива [11]. В нашем случае они учтены в формуле (3) в виде коэффициента структурного ослабления и коэффициента размягчаемости пород. Остается оценить влияние агрессивности минерализованных подземных вод на потерю несущей способности крепления. Рассмотрим этот процесс на примере наиболее распространенных крепей: анкерной, набрызгбетонной и металлической арочной из СВП (специального взаимозаменяемого профиля)

Анкерная крепь. Известно, что средний срок службы анкерной крепи составляет 10 лет (ГОСТ 31559-2012 «Крепи анкерные. Общие технические условия»), а в наиболее благоприятных условиях сухого массива с влажностью шахтного воздуха менее 85 % может достигать 15 лет.

Однако на обводненных участках сроки службы анкеров вследствие воздействия химически агрессивных минерализованных подземных вод существенно уменьшаются. По данным ведущих производителей анкерного крепления в слабоагрессивной среде срок службы анкера уменьшается на 20 % (до 8–12 лет), в среднеагрессивной – в 2,5 раза (до 4–5 лет), а в сильноагрессивной среде он разрушается уже в первые 2–4 года [11–13].

Степень агрессивности подземных вод уточняется в зависимости от комбинации факторов кислотно-щелочного баланса pH, концентрации сульфатов и хлоридов C и среднегодовой температуры шахтного воздуха T (в соответствии с СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии», таблица Х.5 «Степень агрессивного воздействия подземных вод на металлические конструкции»). Так, например, при $T < 0$ °С, $pH > 5$, $C < 5$ г/л, или при 0 °С $< T < 6$ °С, $pH > 5$, $C < 1$ г/л подземные воды слабоагрессивны, и срок безопасной эксплуатации анкера может достигать 8 лет; при $T < 0$ °С, $pH < 5$, или $T < 6$ °С, $pH > 5$; $C < 1$ г/л – среднеагрессивны, и прогнозируемое время эксплуатации анкера сокращается до 4–5 лет.

Набрызгбетонная крепь. На сроки службы набрызгбетонной крепи также влияют коррозионные процессы, но немного другого плана. Коррозия бетона возникает по нескольким причинам. Во-первых, при контакте воды с бетоном происходит растворение и вымывание частиц цементного камня в фильтрационном процессе, при этом образуются дополнительные полости, снижающие прочностные характеристики крепления и приводящие в конечном итоге к его разрушению. Во-вторых, между минералами цементного камня и солями магния, содержащимися в подземных водах, протекают обменные процессы с образованием веществ со сниженными вяжущими свойствами, что дополнительно уменьшает прочность бетонной крепи. В-третьих, агрессивность шахтных вод начинает оказывать негативное влияние на прочностные свойства бетона непосредственно в процессе его затвердевания, т. е. в первые 28 дней. Промышленными экспериментами Института горного дела Севера СО РАН [14] установлено, что прочность торкретированного бетона после его затвердевания в условиях агрессивных шахтных вод на 20–30 % ниже, чем в нейтральных. Очевидно, что снижение прочностных характеристик как монолитной, так и торкретированной крепи [15] влечет за собой сокращение сроков эксплуатации закрепленных выработок. В среднем в наиболее благоприятных условиях сроки безопасной эксплуатации набрызгбетонной крепи составляют около 15 лет, в наиболее неблагоприятных – 5 лет [11].

Металлическая арочная крепь. Изменение несущей способности металлической арочной крепи в процессе ее эксплуатации и коррозионного износа используемого профиля СВП достаточно подробно исследовал В. В. Коваленко [16]. Им установлено, что при достижении толщины коррозионного слоя 0,4–0,6 см несущая способность арочного крепления уменьшается вдвое, а при достижении 1,2–1,4 см крепь, очевидно, полностью изнашивается. При скорости коррозии 0,2–0,4 мм/год арочная крепь утрачивает несущую способность за 20–25 лет.

Выводы и рекомендации. С учетом суммарного влияния изложенных факторов прогнозные сроки безопасной эксплуатации крепей капитальных выработок в зависимости от степени обводненности массива составляют: в наиболее неблагоприятных условиях массивов, обводненными агрессивными минерализованными водами, 5 лет – для набрызгбетонной крепи, 4–5 лет – для анкерной, 20 лет – для металлической арочной крепи; в благоприятных условиях сухих массивов, при низкой влажности шахтного воздуха прогнозные сроки службы крепления можно увеличить в 2–3 раза. Прогнозное время устойчивого состояния приконтурного массива выработок предлагается определять по формуле (3). Окончательную оценку степени опасности выработок следует производить в зависимости от соотношения фактического и расчетного времени устойчивого состояния приконтурного массива самих выработок и их крепления. Наиболее опасные выработки, т. е. те, у которых на исходе расчетный срок службы, изношена крепь, или же попадающие в зону сдвижения от очистных работ, необходимо обследовать визуальными и инструментальными методами.

Рекомендуемые инструментальные методы обследования, в зависимости от предназначения, срока службы выработок и вида крепления: для контроля устойчивости приконтурного массива выработок II категории охраны (основных транспортно-вентиляционных) возможна закладка наблюдательных станций долговременного действия в виде разгрузочных щелей, профильных или парных линий реперов; в выработках III категории охраны (разведочные вентиляционные выработки, вспомогательные квершлаг и штреки, откаточные орты и заезды и т. д.) лучше применять более оперативные методы контроля, например, акустической эмиссии с использованием прибора типа САПФИР или СП-32.

Для контроля состояния крепления в продолжение всего срока эксплуатации выработок рекомендуется комплексное обследование, визуальное и инструментальное с использованием компактных приспособлений: штанговывергивателей (например ПКА-3) для оценки несущей способности анкерной крепи, динамометров и глубинных реперов в скважинах; георадара или бетоноскопа для оценки дефектов в бетонной и железобетонной крепи; ультразвукового толщиномера для оценки толщины профиля (слоя ржавчины) на металлической рамной крепи.

По результатам визуального и инструментального обследования, в случае необходимости, рекомендуется планировать ремонтно-восстановительные работы или ограничение доступа людей в опасные выработки. Предложенный комплексный подход к прогнозу устойчивости капитальных горизонтальных выработок и их крепления позволит оперативно поддерживать работоспособное состояние в течение требуемого срока эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Исследование напряженно-деформированного состояния полевых выработок при отработке крутопадающих жил с целью прогноза их устойчивости // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2023. № 3. С. 436–447.
2. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Ваулина И. Б. Поддержание горных выработок в соляных породах // ГИАБ. 2017. № 2. С. 344–356.

3. Технология разработки золоторудных месторождений / под ред. В. П. Неганова. М.: Недра. 1995. 336 с.
4. Vasilyev D. S., Pavlov A. M. Justification of underground gold placer development parameters for the Konevinsky deposit // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources: 2nd International Scientific Conference, 2020. Art. 012042.
5. Avdeev A., Sosnovskaya E., Krinitsyn R. The geomechanical state of the mine «Mnogovershinnoe» lower levels monitoring // E3S Web of Conferences. Problems of Complex Development of Georesources: VII International Scientific Conference. 2018. Vol. 56. Art. 02017. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602025
6. Carlos Agelet de Saracibar. Nonlinear continuum mechanics – an engineering approach. Springer, 2022. 346 p. DOI:10.1007/978-3-031-15207-8
7. Рьльникова М. В., Зотеев О. В. Геомеханика. М.: Руда и Металлы, 2003. 240 с.
8. Ялымов Н. Г. Исследование напряженного состояния массива горных пород на рудных месторождениях Киргизии // Прикладные задачи механики горных пород. М.: Наука, 1977. С. 26–27.
9. Павлов А. М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2013. 128 с.
10. Kirsanov A. K., Karvanen A. E., Anushenkov S. V. A review of the methods of mine support protection from the effect of different types of corrosion // Minerals and Mining Engineering. 2023. No. 4. P. 9–15. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-9-15
11. Авдеев А. Н., Харисов Т. Ф. Прогноз сроков безопасной службы горнокапитальных выработок // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2021. № 4. С. 223–232.
12. Jinrong Ma K., Stankus J., Faulkner D. Development and evaluation of corrosion resistant coating for expandable rock bolt against highly corrosive ground conditions // International journal of mining science and technology. 2018. Vol. 28(1). P. 145–151. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.12.023
13. Meikle T., Tadolini S. C., Sainsbury B., Bolton J. Laboratory and field testing of bolting systems subjected to highly corrosive environments // International journal of mining science and technology. 2017. Vol. 27(1). P. 101–106. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.11.017
14. Курилко А. С., Дроздов А. В., Алексеев К. Н., Никифорова А. Д. Влияние хлоридных кальциевых рассолов на прочность торкрет-бетона, изготовленного на основе местных заполнителей (на примере рудника «Удачный») // ГИАБ. 2014. № 2. С. 17–21.
15. Bernard E. S. Changes in long-term performance of fibre reinforced shotcrete due to corrosion and embrittlement // Tunnelling and underground space technology. 2020. Vol. 98. P. 33–35. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103335
16. Коваленко В. В. Защита металлической крепи от коррозии с использованием торкрет-бетона. Днепрпетровск: Национальный горный университет, 2012. 108 с.

Поступила в редакцию 14 мая 2024 года

Сведения об авторах:

Сосновская Елена Леонидовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: stress.igd@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4795-1383>

Авдеев Аркадий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: avdeev0706@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1023-7645>

Харисов Тимур Фаритович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН. E-mail: timur-ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4668-081X>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-6-80-88

Predicting driftway stability when developing gold fields by the underground method

Elena L. Sosnovskaia¹, Arkadii N. Avdeev¹, Timur F. Harisov¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. When developing gold fields by the underground method an urgent problem is to maintain the predefined lifetime of mine workings. This issue has mainly been studied for rock masses with high rheological properties (potassium, coal) and long-term displacements of mine

support and marginal rock mass of mine workings. For rock masses of gold fields, where brittle fracture deformations prevail, it is difficult to control and ensure the stability of permanent workings and their support. Therefore, forecasting the stability of long-used mine workings is relevant.

Methods of research provide for a comprehensive approach including the scientific and technical sources analysis; identification of the reasons for the actual mine working damage and mine support wear based on geological-surveying documentation and mine inspection at gold mines in Russia; finite-element modelling of mine-induced stresses in the marginal rock mass of mine workings.

Results. Three main reasons for mine working failure at gold fields have been established: rock mass shear processes development, the influence of rock pressure and mine support bearing capacity failure due to wear. Based on the research results, a method was developed for assessing the safe operation life of permanent and preparatory mine workings. The assessment is to be carried out depending on a combination of mine geological and technical factors, namely, the depth of mining, strength characteristics, the effect of the stope abutment pressure zone, marginal rock mass jointing, inundation, and the degree of water aggressiveness. The approximate wear time of driftways support has been determined, taking into account service conditions.

Keywords: driftways; stability; gold fields; lifetime; mine support; support wear.

The research was carried out within the state assignment no. 075-00412-22 IIP. Theme no. 3 (2022–2024). (FUWE-2022-0003), reg. no. 1021062010536-3-1.5.1.

REFERENCES

1. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Study of the stress-strained state of field workings during the steep dipping veins mining in order to predict workings stability. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2023; 3: 436–447. (In Russ.)
2. Soloviev V. A., Aptukov V. N., Vaulina I. B. Support of mining workings in saliferous rocks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 2: 344–356. (In Russ.)
3. Neganov V. P. (ed.) *Gold field development technology*. Moscow: Nedra Publishing; 1995. (In Russ.)
4. Vasilyev D. S., Pavlov A. M. Justification of underground gold placer development parameters for the Konevinsky deposit. In: *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources: 2nd International Scientific Conference*, 2020. 012042.
5. Avdeev A., Sosnovskaya E., Krinitsyn R. The geomechanical state of the mine «Mnogovershinnoe» lower levels monitoring. In: *E3S Web of Conferences. Problems of Complex Development of Georesources: VII International Scientific Conference*. 2018; 56: 02017. Available from: doi: 10.1051/e3sconf/20185602025
6. Carlos Agelet de Saracibar. *Nonlinear continuum mechanics – an engineering approach*. Springer, 2022. 346 p. Available from: doi:10.1007/978-3-031-15207-8
7. Rylnikova M. V., Zoteev O. V. *Geomechanics*. Moscow: Ruda i Metally Publishing; 2003. (In Russ.)
8. Ialymov N. G. Studying the stress-strain state of the rock mass at ore deposits of Kyrgyzstan. *Prikladnye zadachi mekhaniki gornykh porod = Applied Problems of Rock Mechanics*. Moscow: Nauka Publishing; 1977. p. 26–27. (In Russ.)
9. Pavlov A. M. *Improving the technology of vein gold deposits underground development: monograph*. Irkutsk: IrSTU Publishing; 2013. (In Russ.)
10. Kirsanov A. K., Karvanen A. E., Anushenkov S. V. A review of the methods of mine support protection from the effect of different types of corrosion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 9–15. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-4-9-15
11. Avdeev A. N., Kharisov T. F. Prediction of the safe service life of mine workings. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 4: 223–232. (In Russ.)
12. Jinrong Ma K., Stankus J., Faulkner D. Development and evaluation of corrosion resistant coating for expandable rock bolt against highly corrosive ground conditions. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018; 28(1): 145–151. Available from: doi: 10.1016/j.ijmst.2017.12.023
13. Meikle T., Tadolini S. C., Sainsbury B., Bolton J. Laboratory and field testing of bolting systems subjected to highly corrosive environments. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017; 27(1): 101–106. Available from: doi: 10.1016/j.ijmst.2016.11.017
14. Kurilko A. S., Drozdov A. V., Alekseev K. N., Nikiforova A. D. Influence of calcium chloride underground brines on the strength of sprayed concrete, which is made on the basis of local fillers (by the example of mine Udachnyi). *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 2: 17–21. (In Russ.)

15. Bernard E. S. Changes in long-term performance of fibre reinforced shotcrete due to corrosion and embrittlement. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 98: 33–35. Available from: doi: 10.1016/j.tust.2020.103335

16. Kovalenko V. V. *Protecting metal supports from corrosion using shotcrete*. Dnipropetrovsk: Dnipro University of Technology; 2012. (In Russ.)

Received 14 May 2024

Information about the authors:

Elena L. Sosnovskaia – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher of the Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: stress.igd@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4795-1383>

Arkadii N. Avdeev – PhD (Engineering), senior researcher of the Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: avdeev0706@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1023-7645>

Timur F. Harisov – PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: timur-ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4668-081X>

Для цитирования: Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н., Харисов Т. Ф. Прогноз устойчивости горизонтальных выработок при подземной отработке золоторудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 6. С. 80–88. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-6-80-88

For citation: Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N., Kharisov T. F. Predicting driftway stability when developing gold fields by the underground method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 6: 80–88 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-6-80-88