

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОХОДКИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А. Н. Анушенков, Н. В. Фирсов✉

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ kolya-firsov-86@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются актуальные вопросы обеспечения безопасности проходки горных выработок в сложных горно-геологических условиях с применением усиленной комбинированной крепи (УКК) в грудь забоя и современных методов управления кровлей. Описаны основные преимущества применения УКК для укрепления забоя и предотвращения обрушений в неустойчивых горных массивах. Рассматриваются инновационные методы мониторинга и управления напряжением в кровле, а также использование гибридных крепежных систем для повышения устойчивости кровли в сложных условиях. Особое внимание уделяется практическому значению новых технологий для улучшения безопасности и эффективности горных работ. Описаны новые технологии управления кровлей, включая системы мониторинга и контроля напряжений, а также гибридные крепежные системы. Представлены результаты оценки эффективности данных методов в повышении безопасности и снижении рисков при проведении горных работ. Выявлено, что интеграция этих методов в горнодобывающую промышленность способствует снижению рисков и повышению производительности при проходке в сложных горно-геологических условиях.

**Ключевые слова:** горнодобывающая промышленность, безопасность горных выработок, усиленная комбинированная крепь, управление кровлей, мониторинг напряжений, укрепление забоя, сложные геологические условия, гибридные крепежные системы, предотвращение обрушений

**Для цитирования:** Анушенков АН, Фирсов НВ. Обеспечение безопасности проходки горных выработок в сложных горно-геологических условиях. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(2):97-104. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-97-104>.

## ENSURING THE SAFETY OF MINING OPERATIONS IN DIFFICULT MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

A. N. Anushenkov, N. V. Firsov✉

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ kolya-firsov-86@mail.ru

**Abstract.** The article discusses current issues of ensuring the safety of mining operations in difficult mining and geological conditions using reinforced combined support (RCS) in the face area and modern methods of roof management. The main advantages of using RCS to strengthen the face and prevent collapses in unstable rock massifs are described. Innovative methods for monitoring and managing roof stress, as well as the use of hybrid fastening systems to improve roof stability in complex conditions are considered. Particular attention is paid to the practical significance of new technologies for improving the safety and efficiency of mining operations. New roof management technologies are described, including stress monitoring and control systems, as well as hybrid fastening systems. The results of assessing the effectiveness of these methods in improving safety and reducing risks during mining operations are presented. It is concluded that the integration of these methods into the mining industry helps to reduce risks and improve productivity when driving in complex geology.

**Keywords:** mining, mine safety, reinforced combined support (RCS), roof management, stress monitoring, face reinforcement, complex geological conditions, hybrid support systems, collapse prevention

**For citation:** Anushenkov AN, Firsov NV. Ensuring the safety of mining operations in difficult mining and geological conditions. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(2):97-104. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-97-104>.

### Введение

**П**роходка горных выработок в условиях сложной геологии всегда сопряжена с высоким уровнем риска. Одной из главных проблем при разработке подземных месторождений является обеспечение безопасности работающих там людей, устойчивости выработки и минимизация последствий воздействия на горный массив.

При освоении месторождений сложные условия залегания полезных ископаемых сочетаются с большой глубиной горных разработок. В условиях сложной горно-геологической обстановки возникает задача обеспечения устойчивости крупных камерных выработок и выработок, находящихся в зонах взаимного воздействия [1].

Разработка месторождений в условиях сложной горно-геологической и горнотехнической обстановки может сопровождаться такими обстоятельствами как неблагоприятные климатические условия, наличие незащищённых пустот, создание искусственных закладочных массивов, высокая степень трещиноватости и фрагментации пород, а также зоны окисления руд, содержащих серу [2]. Всё это требует усиления рамных крепей для поддержания горных выработок в безопасном и рабочем состоянии.

Проектирование и эксплуатация крупногабаритных горных выработок подразумевает учёт процессов критического деформирования горного массива, происходящих вокруг этих выработок. Это необходимо для правильного определения последовательности строительства выработок, регулирования отставания от забоя и выбора оптимальных типов крепления [1].

Опыт ведения горных работ свидетельствует о том, что укрепление горных выработок является высокочрезвычайно трудоемким процессом. Стоимость укрепительных конструкций может составлять до половины общей стоимости выработок, так же, как и на их установку. Ухудшение горно-геологических условий напрямую увеличивает расходы на поддержание выемочных выработок, охраняемых традиционными методами и средствами [3].

При наличии неустойчивых пород, высоких напряжений и возможных выбросов из недр применяются современные методы укрепления горных выработок. Одним из таких методов является использование усиленной комбинированной крепи (УКК) в грудь забоя, которая обеспечивает немедленное укрепление забоя и повышает его устойчивость. Вместе с тем, новые методы управления кровлей и использование автоматизированных систем мониторинга позволяют значительно повысить безопасность и эффективность горных работ.

Проходка горных выработок в сложных геологических условиях требует внедрения инновационных методов, которые позволяют повысить безопасность и улучшить технологическую эффективность. Применение УКК в грудь забоя и новых методов управления кровлей, а также разработка нового паспорта крепления открывают новые возможности для оптимизации процесса проходки. Интеграция современных технологий, таких как системы мониторинга и новые материалы, минимизирует риски и снижает затраты, что делает данный подход перспективным направлением для горной промышленности.

**Цель обзора** – систематизация существующих данных о применении усиленной комбинированной крепи в сложных геологических условиях, оценка их эффективности и анализ

современных методов управления кровлей, направленных на снижение рисков обрушений и повышение устойчивости выработок.

### Материалы и методы

Для выполнения данного обзора были проанализированы публикации, касающиеся вопросов безопасности горных работ, методов укрепления горных выработок, в частности, применения УКК, а также современных технологий управления кровлей. Источники информации включали статьи, опубликованные в международных и российских научных журналах, рецензируемые обзоры, монографии и отчёты по результатам горно-технических исследований. Основные поисковые базы данных включали Google Scholar, Scopus, Web of Science и Российскую электронную библиотеку (eLibrary).

Критерии отбора публикаций включали исследования, проводимые в период с 2000 по 2023 гг., в которых рассматривались вопросы проходки выработок в сложных геологических условиях с акцентом на повышение безопасности за счёт применения укрепляющих конструкций и управления напряжённым состоянием кровли. Были отобраны исследования, описывающие методы применения усиленной комбинированной крепи в грудь забоя, а также теоретические и практические работы по управлению напряжениями в горных породах.

Критериями отбора публикаций были установлены:

1. Статьи, содержащие экспериментальные данные о применении УКК.
2. Публикации, описывающие методы мониторинга состояния кровли.
3. Работы, посвящённые оценке рисков и безопасности проходки выработок в сложных геологических условиях.
4. Исследования, содержащие предложения по совершенствованию технологии крепи и управления кровлей.

Анализ источников позволил провести оценку эффективности применения УКК и методов управления кровлей в различных геологических условиях и сформировать общие выводы о текущем состоянии и перспективах развития этих технологий.

### Результаты и обсуждение

Сложные геологические условия характеризуются наличием зон повышенного горного давления, трещиноватых и обводнённых пород, а также возможными зонами обрушения кровли [4]. Эти факторы создают необходимость использования инновационных решений для минимизации рисков и обеспечения устойчивости выработки на всех этапах её эксплуатации [5].

Главными рисками при проходке горных выработок в таких условиях являются:

- внезапные обрушения кровли;
- горные удары и выпирания пород;
- сдвиги пород в зоне забоя;
- подвижки кровли, вызывающие перекосы или обрушения крепи.

В подземных шахтах при проходке выработок в сложных горно-геологических условиях с нестабильными окружающими породами используются тяжёлые металлические рамные крепи, такие как СВП-22 и СВП-27, для обеспечения устойчивости выработок. Однако их установка в условиях шахт отличается высокой трудоемкостью и несет в себе определенные риски для безопасности.

В последние несколько десятилетий практически в каждой выемочной выработке при ее проходке обнаруживаются тектонические разрывы с амплитудами от 15 до 40 м, которые не были выявлены геологической разведкой. Разрывы со средними и малыми амплитудами представляют собой зоны сильного трещинообразования пород, которые располагаются вдоль разломов и могут достигать ширины до 20 м. В качестве непосредственной кровли чаще всего выступают тонкослоистые алевролиты, которые варьируются по устойчивости от очень неустойчивых до устойчивых. Около 20 % площади шахтного поля составляют участки с ложной кровлей толщиной от 0,2 до 0,5 м, а также с нестабильной непосредственной кровлей. Плитки алевролитов, формирующиеся на плоскостях ослабленных наслоений, могут иметь толщину до 3 см. [6]. Тонкоплитчатое состояние алевролитов приобретают в условиях отсутствия крепления или под воздействием горного давления, возникающего по контуру выработки. Толщина непосредственной кровли варьируется в пределах от 7 до 18 м.

Опираясь на данные визуальных и инструментальных наблюдений, специалисты предположили, что установка анкеров в приконтурной зоне горных пород способствует увеличению несущей способности кровли и боковых стенок выработки, что значительно снижает скорость и объем смещений непосредственной кровли, предотвращая её критическое сдвижение. В связи с этим рекомендуется использовать анкера винтового типа А20В, при креплении подготовительных выработок с полным заполнением шпура полимерным составом [7].

Инструментальные замеры, выполненные на шахте «Воргашорская» в сложных горногеологических условиях в выемочных выработках приконтурного породного массива, поддерживаемых за очистными забоями в период внедрения бесцеликовой технологии отработки столбов, проводимых как по падению, так и по простиранию пласта, показали, что смещения кровли в местах сопряжения вентиляционных и воздухоподающих выработок с очистными забоями всегда превышали проектные значения податливости крепи [8].

В исследовании Зуева и др. (2012) при разделении срока службы подготовительных выработок на пять этапов основная часть смещений боковых пород приходилась на те периоды, когда выработки находились в зонах влияния очистных работ. В эти периоды суммарные смещения кровли и почвы составляли до 65 % от общего объема смещений [3]. В более

чем половине случаев смещения кровли в два и более раза превышали расчетные показатели. В отдельных выработках величина опускания кровли достигала тройного значения паспортной податливости крепи.

На рис. 1 показана изменяющаяся форма контура выемочных выработок разной конфигурации за очистным забоем с учетом влияния выработанного пространства и близко расположенного тектонического разрыва (рис. 1а).

В процессе поиска более эффективных методов повышения устойчивости выемочных выработок, подверженных воздействию очистных работ, на шахте была внедрена комбинированная технология использования рамной и анкерной крепи. Для дальнейшего совершенствования технологии стабилизации выработок, с опорой на опыт применения рамно-анкерной крепи при подготовке и отработке выемочных столбов, крепление конвейерных выработок осуществлялось в два этапа. На первом этапе, при проведении выработки, устанавливали рамную крепь, а на втором этапе, на стадии отработки выемочного столба, на расстоянии 40 м впереди забоя лавы между рамами возводилась анкерная крепь. Разделение процессов крепления во времени и пространстве позволило улучшить эксплуатационные характеристики выработок позади лавы на 35 % по сравнению с использованием только рамной крепи [9]. Однако для повышения безопасности проходки выработок требуется применение более современных технологий управления породами, обеспечивающих контроль за состоянием горных пород в реальном времени.

Проходка горных выработок, особенно в условиях нестабильных пород и повышенного горного давления, традиционно выполняется с использованием временной крепи и технологий по усилению кровли [10]. Однако такие методы как временная крепь и установка анкерных систем часто сопряжены с проблемами в сложных геологических условиях. В частности, работы Gaofeng Song et al. (2017) подтверждают, что трещиноватые и обводненные породы создают дополнительные трудности для традиционных способов проходки, особенно в глубоких шахтах [11]. Это требует внедрения методов, обеспечивающих не только временную устойчивость, но и долговременную эффективность.

Сложные геологические условия характеризуются рядом факторов, которые значительно усложняют процесс проходки и требуют особых методов для предотвращения аварийных ситуаций.

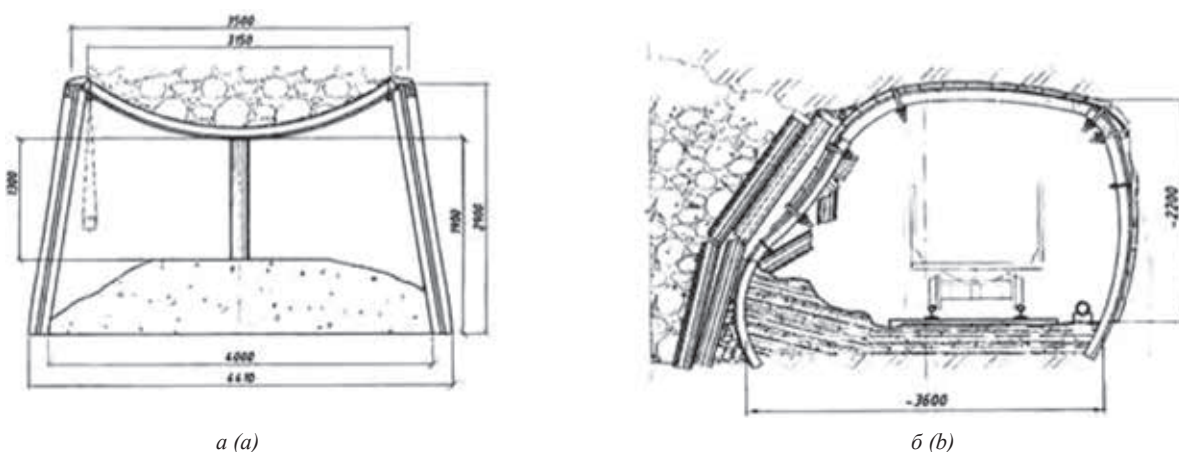


Рис. 1. Конфигурация изменения контура очистных забоев трапецевидной (а) и арочной (б) формы выемочных выработок /  
Fig. 1. Configuration of the contour of the treatment faces of trapezoidal (a) and arched (b) excavation workings

К основным характеристикам таких условий относятся:

- *Высокое горное давление.* Увеличение давления в массиве горных пород может вызвать подвижки кровли и сдвиги пород, что приводит к нестабильности выработки.

- *Трещиноватость пород.* Зоны трещиноватости склонны к деформации под влиянием горных давлений, что повышает риск обрушений [12].

- *Обводненность пород.* Вода может усилить процессы эрозии и деформации, создавая дополнительные угрозы для устойчивости выработки [13].

Как показывает практика, традиционные методы проходки в таких условиях, включая использование стандартных видов крепи и временных поддержек, не всегда способны обеспечить достаточный уровень безопасности. Требуются более современные и адаптивные методы стабилизации забоя.

Исследования показывают, что одним из самых эффективных методов укрепления забоя в сложных геологических условиях является усиленная комбинированная крепь (УКК) (Экгардт и др., 2019) [14]. УКК представляет собой комплекс мер и конструкций, направленных на поддержание устойчивости горных пород непосредственно в зоне забоя и предотвращение их разрушения. Она включает в себя сочетание различных элементов крепежных систем, которые позволяют стабилизировать породы в зоне активной проходки и предотвращать обрушения. По сравнению с традиционными методами крепления, УКК обеспечивает более оперативную и эффективную защиту забоя, что значительно снижает вероятность возникновения аварийных ситуаций (Калмыков и др., 2015) [15].

УКК включает использование различных типов крепежных систем, таких как анкерные, рамные и сетчатые конструкции. Эти элементы могут комбинироваться для достижения максимальной устойчивости пород в зависимости от конкретных условий работы. Например, анкеры обеспечивают механическую фиксацию горного массива, а сетчатые и рамные элементы удерживают мелкие фрагменты породы от выпадения.

Основной задачей УКК в грудь забоя является оперативное укрепление породы в зоне непосредственного разрушения (забоя). Это предотвращает обрушения пород в момент проходки и снижает опасность для работников, которые занимаются буровыми и проходческими работами. В отличие от традиционных методов крепления, которые могут быть установлены только на определённом расстоянии от фронта работ, УКК используется прямо в грудь забоя, что обеспечивает максимальную защиту в зоне активных горных работ.

УКК особенно эффективна в условиях сложной геологии – в зонах с высокой тектонической активностью, слабыми породами или сильными сдвигами горной поверхности. В таких ситуациях комбинированные системы крепи помогают не только стабилизировать породы, но и предотвращать динамические разрушения горного массива.

Следует отметить, что УКК может быть адаптирована под конкретные геологические условия и типы пород. Благодаря этому система обеспечивает гибкость и универсальность при различных сложных условиях, когда требуется немедленная стабилизация и укрепление горных пород.

В ряду преимуществ применения УКК можно назвать:

- *повышение уровня безопасности:* УКК снижает риск обрушений и выбросов породы, что значительно улучшает

условия труда для шахтёров и персонала, работающего на проходке. (Исследование методов укрепления горных выработок в угольных шахтах показало, что применение УКК снижает частоту обрушений на 25-30 %, а также увеличивает продолжительность работы горных выработок без аварий (Тимошенко, 2018) [16].

- *увеличение производительности:* оперативное укрепление забоя позволяет продолжать проходческие работы без длительных перерывов на установку крепи, что ускоряет темпы выполнения работ;

- *снижение затрат:* применение УКК позволяет снизить расходы на ликвидацию последствий обрушений и уменьшить затраты на аварийные работы.

Кроме того, данный метод основан на компенсации горных давлений в зоне забоя и перераспределении напряжений в массиве пород, что предотвращает разрушения кровли и стенок выработки [17].

По данным исследований А.М. Грибанова, применение УКК позволяет стабилизировать выработку и снизить риск аварий на всех этапах проходки [18]. Компенсационные системы крепи включают элементы, способные изменять свои параметры в зависимости от динамики горных давлений, что делает их эффективными в условиях нестабильных пород.

Одной из ключевых задач при проходке выработок в условиях сложных геологических структур является управление кровлей, поскольку кровля имеет тенденцию к деформациям и обрушениям. Традиционные методы управления кровлей, такие как анкерные системы и рамные крепления, обеспечивают базовую защиту, однако в условиях динамически меняющихся нагрузок они могут оказаться недостаточно эффективными (Zhang et al., 2020) [19].

Современные методы управления кровлей включают использование гибридных крепежных систем, состоящих из комбинации жёстких и гибких элементов, что позволяет значительно увеличить устойчивость кровли в зонах с высоким уровнем напряжений [20]. Такие системы способны адаптироваться к изменениям в нагрузках и предотвращать внезапные разрушения.

Также важным элементом является применение мониторинга состояния кровли с помощью датчиков напряжений, установленных по периметру выработки. Эти системы позволяют в реальном времени отслеживать изменения в кровле и принимать меры для укрепления наиболее опасных участков до момента их разрушения (Бейсембаев и др., 2019) [21]. Это значительно повышает безопасность работ и снижает риск аварий.

УКК как технологическое решение для укрепления забоя горной выработки на ранних стадиях проведения работ особенно важна в условиях сложных геологических разломов, деформаций горных пород или повышенной сейсмической активности. УКК работают по принципу укрепления горного массива вблизи места разрушения породы, создавая защитную оболочку, которая препятствует обрушению забоя и минимизирует воздействие внешних факторов на него. Данный метод также позволяет сократить время на поддержание выработки, так как УКК работают быстро и эффективно в сравнении с традиционными методами укрепления горной породы. В сложных геологических условиях такие системы могут стать ключевым элементом безопасности, обеспечивая как сохранение стабильности забоя, так и повышение скорости проходки.



Основная цель УКК – снижение напряжений в массиве пород и компенсация давления, возникающего при углублении забоя. Это достигается за счет использования крепи с регулируемыми параметрами, которая адаптируется к изменениям горного давления и динамике пород. Вероятность внезапных обрушений кровли снижается за счет компенсации горных давлений и перераспределения напряжений в массиве. Компенсационный крепеж позволяет обеспечить стабильность забоя на протяжении всей проходки, что особенно важно в условиях неустойчивых пород. Регулируемая система крепления легко адаптируется к изменяющимся условиям, обеспечивая безопасность даже в самых сложных зонах выработки. УКК особенно эффективно при проходке в зонах трещиноватых пород и в условиях высоких напряжений, где традиционные методы крепления не дают удовлетворительных результатов.

Как уже было сказано выше, особо внимания и контроля в сложных условиях требует кровля горных выработок, поскольку именно она часто является источником основных угроз для безопасности шахтёров и оборудования. Традиционные методы управления кровлей предполагают крепление с помощью анкерных систем, рамных и болтовых креплений, что часто оказывается недостаточно эффективным в условиях сложной геологии, требуются новые технологии, более адаптивные и эффективные.

В настоящее время существуют определенные трудности при обосновании безопасной работы рудника, связанные с тем, что условия разработки существенно меняются по мере увеличения глубины горных работ. Оценка устойчивости на больших глубинах включает анализ напряженно-деформированного состояния как массива, так и крепи крупных выработок, а также взаимовлияния различных выработок в слабом раздробленном массиве. При этом необходимо учитывать влияние постоянно действующих гравитационных и тектонических напряжений, которые превышают предел прочности горных пород.

В связи с этим были разработаны новые подходы к управлению кровлей, направленные на повышение безопасности и снижение затрат на проведение выработок.

Так, в исследовании Г.С. Жетесовой и др. описаны новые технологии камерной выемки нарушенных запасов твердых полезных ископаемых с применением подвижных крепей [22]. Процесс выемки осуществляется короткими заходками от основного штрека, где в забое и подготовительных выработках используется поворотный конвейер с изменением направления движения камеры при обратном ходе. Эти методы позволяют уменьшить потери минералов и адаптировать схемы крепления в зависимости от действующего горного давления. Представленная модель учитывает увеличивающееся сопротивление пород при их деформации, определяемое приведенным модулем упругости, а также активные нагрузки, рассчитанные исходя из работы предохранительных клапанов гидростоек. Исследование демонстрирует, что, изменяя степень распора секций крепи, можно регулировать состояние забоя и уступа, способствовать его контролируемому обрушению и обеспечивать безопасность работников. В случае применения технологии с выпуском потолочины возможна эффективная работа выдвижных механизмов, обеспечивающих дробление и выпуск минералов уступа при защите от обрушенных пород.

Также представлен вариант, при котором вся камера мо-

жет смещаться в сторону без изменения ширины. Камера может иметь ширину до 20 м, а длина заходки составлять 30-40 м, что упрощает контроль над кровлей и снижает потери угля в целиках.

На рис. 2 показано сравнение вариантов обхода нарушений.

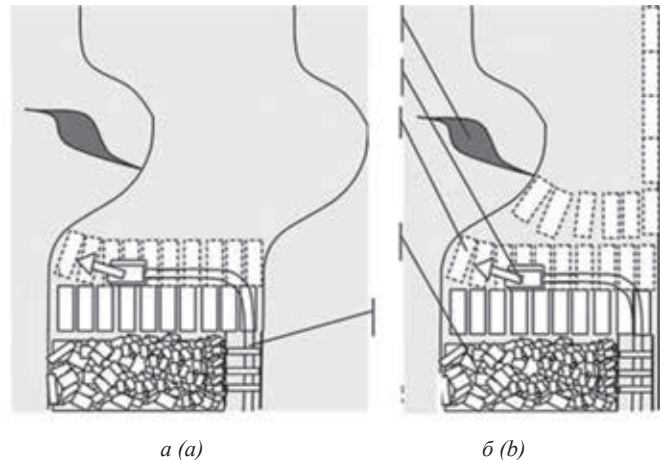


Рис. 2. Сравнение вариантов обхода нарушений: а - без изменения ширины камеры; б - с изменением ширины камеры /  
Fig. 2. Comparison of circumvention options for violations when the width of the chamber does not change (a) and changes (b) up the levels

Воздействие сопротивления крепи на положение уступа варьируется и определяется такими факторами, как состав пород и структура горного массива в зоне забоя, в связи с чем управленческие решения должны приниматься индивидуально на каждом этапе продвижения. Методы управления зависят от текущего состояния массива, и при наличии аномалий может возникнуть необходимость в значительном изменении подходов, что моделируется с помощью специализированного программного обеспечения. Возможность регулирования напряженно-деформированного состояния (НДС) уступа и призабойной части пласта за счет распора крепи была подтверждена. Однако степень такого воздействия следует оценивать в зависимости от конкретных условий.

В частности, можно использовать современные системы мониторинга и управления напряжением в кровле. Такие системы, оснащённые датчиками и автоматизированными механизмами, позволяют в реальном времени отслеживать изменения в структуре горного массива и принимать меры по предупреждению обрушений. В условиях сложной геологии эти системы могут выявлять зоны повышенной опасности задолго до появления трещин или разрушений, что позволяет заблаговременно укрепить участок.

Другим перспективным направлением является применение гибридных крепежных систем, которые сочетают в себе традиционные методы управления кровлей и современные технологии укрепления. Такие системы могут быть выполнены с использованием композитных материалов или гибких конструкций, способных выдерживать сильные динамические нагрузки и адаптироваться под меняющиеся условия горного массива.

Так, использование в процессе крепления новых материалов с повышенной прочностью и устойчивостью к коррозии позволяет значительно увеличить долговечность и устойчивость крепежных элементов. Метод активного управления кровлей, основанный на контроле за состоянием кровли с

использованием систем мониторинга, которые анализируют деформации и подвижки пород в реальном времени, с помощью данных от датчиков позволяет оперативно принимать меры по усилению крепи или изменению схемы управления кровлей.

Также важен паспорт крепления, в котором регламентированы не только типы и параметры крепи, но и последовательность операций по управлению кровлей в различных геологических условиях. Паспорт крепления разрабатывается с учетом локальных условий и динамических изменений в породах [23]. Основной целью разработки паспорта крепления является обеспечение комплексного подхода к управлению кровлей и оптимизация всех этапов крепежных работ. Он включает в себя детализированные схемы установки крепежа, рекомендации по применению УКК и активных методов управления кровлей и протоколы мониторинга состояния кровли и крепи.

Применение новых методов управления кровлей и использование УКК в грудь забоя имеют важное значение не только с точки зрения повышения безопасности, но и в плане увеличения эффективности горных работ. Проходка выработок в сложных геологических условиях часто сопряжена с большими затратами времени и ресурсов на обеспечение безопасности. Новые технологии позволяют значительно снизить эти затраты, при этом обеспечивая более высокий уровень защиты.

Одним из ключевых преимуществ является интеграция этих решений в систему управления рисками на шахте. Системы мониторинга и автоматизированные крепежные комплексы могут быть интегрированы с общими системами безопасности предприятия, что позволит не только предсказывать возможные аварии, но и оперативно реагировать на возникающие угрозы [24].

Также важно особо подчеркнуть, что в условиях увеличения глубины проходки и перехода к более сложным условиям добычи полезных ископаемых, безопасность работников становится вопросом первостепенной важности. Технологии, такие как УКК и новые методы управления кровлей, открывают перспективы для более безопасного и продуктивного освоения подземных ресурсов, что имеет значительное социальное и экономическое значение.

Интеграция современных технологий и материалов в традиционные процессы проходки горных выработок позволяет не только повысить безопасность, но и улучшить общую технологическую эффективность. Применение УКК в сочетании с новыми методами управления кровлей позволяет:

- минимизировать аварийные ситуации;
- сократить время на ремонт крепи и устранение обрушений;
- снизить затраты на материалы за счет более рационального их использования;
- повысить скорость проходки за счет стабилизации кровли и забоя.

При внедрении новых технологий также возникают определенные риски, связанные с недостатком опыта их использования в конкретных условиях или неправильной настройкой систем мониторинга. Поэтому важно учитывать индивидуальные особенности каждого объекта и проводить тщательные предварительные исследования перед применением инновационных решений.

Внедрение предложенных методов и технологий может

быть реализовано на различных этапах горных работ, включая проектирование, подготовку и непосредственную проходку выработок. Рекомендации по использованию УКК и новых методов управления кровлей могут быть включены в стандарты безопасности горных работ, что позволит унифицировать подходы и повысить общий уровень безопасности проходки горных выработок.

Несмотря на успехи в применении УКК и новых методов управления кровлей, остаются вопросы, связанные с их широкомасштабным внедрением и адаптацией к различным типам пород и горных выработок. Исследования показали, что дальнейшее развитие технологий должно быть связано с интеграцией автоматизированных систем мониторинга с крепежными системами, что позволит своевременно обнаруживать потенциальные проблемы и оперативно на них реагировать [25].

Кроме того, перспективным направлением является разработка новых материалов для гибридных крепей, которые смогут лучше адаптироваться к динамическим нагрузкам и обеспечивать большую долговечность конструкции. Это позволит снизить эксплуатационные затраты и повысить уровень безопасности.

### Заключение

1. В современном мире с ростом потребностей в минеральных ресурсах и расширением горнодобывающей промышленности в более труднодоступные зоны, вопросы безопасности при проведении выработок становятся первостепенными. Основная задача заключается в обеспечении устойчивости горных массивов и защиты людей, работающих на проходке.

2. Безопасность проходки горных выработок в сложных геологических условиях зависит от применения современных методов укрепления забоя и управления кровлей. УКК в грудь забоя и новые методы мониторинга и управления напряжением в кровле позволяют не только повысить безопасность работы шахтеров, но и увеличить эффективность проведения горных работ. Внедрение этих решений в горнодобывающую промышленность имеет важное значение для обеспечения устойчивого развития отрасли и сохранения жизни и здоровья работников.

3. Проходка горных выработок в сложных геологических условиях требует применения современных технологий для обеспечения безопасности и устойчивости. Применение усиленной комбинированной крепи (УКК) в грудь забоя и новых методов управления кровлей демонстрирует высокую эффективность в снижении рисков обрушений и повышении производительности работ.

4. Введение автоматизированных систем мониторинга состояния кровли и использование гибридных крепежных систем открывают новые перспективы для улучшения безопасности горных работ. Однако дальнейшие исследования необходимы для адаптации этих технологий к различным геологическим условиям и повышения их эффективности на практике.

### Выводы

1. Основной задачей УКК в грудь забоя является оперативное укрепление породы в зоне непосредственного разрушения (забоя). Это предотвращает обрушения пород в момент проходки и снижает опасность для работников, которые занимаются буровыми и проходческими работами. В отличие от традиционных методов крепления, которые могут быть

установлены только на определённом расстоянии от фронта работ, УКК используется прямо в грудь забоя, что обеспечивает максимальную защиту в зоне активных горных работ.

2. Результаты исследований могут быть полезными при обеспечении безопасности проходки горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Каюмова АН, Балеке АЕ, Харисов ТФ. Оценка безопасности проходки сближенных капитальных камерных выработок в сложных горно-геологических и геотехнических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;7:131–47. [Kayumova AN, Balek AE, Kharisov TF. Assessment of the safety of driving closely spaced capital chamber workings in complex mining, geological and geotechnical conditions. *Mining information and analytical bulletin*. 2022;7:131–47 (In Russ.)]. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_7\\_0\\_131](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_131).
2. Шапошник ЮН, Неверов АА, Неверов СА, и др. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;3:108–18. [Shaposhnik YuN, Neverov AA, Neverov SA, et al. Assessment of the impact of accumulated voids on the safety of mining the Artemyevsky deposit. *Physical and technical problems of mineral development*. 2017;3:108–18 (In Russ.)].
3. Зуев ВА, Янко ИВ, Погудин ЮМ, и др. Применение конструкций крепи подготовительных выработок активного воздействия на кровлю в сложных горно-геологических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;8:27–34. [Zuev VA, Yanko IV, Pogudin YuM, et al. Application of support structures for development workings with active impact on the roof in complex mining and geological conditions. *Mining information and analytical bulletin*. 2012;8:27–34 (In Russ.)].
4. Черняк ИЕ, Бурчаков ЮМ. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт. 1984: 303. [Chernyak I.Ye., Burchakov Yu.M. Management of rock pressure in development workings of deep mines. 1984: 303 (In Russ.)].
5. Трубецкой КН, Галченко ЮП. Геоэкология освоения недр и экогеотехнологии разработки месторождений. 2015: 360. [Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. Geoeology of subsoil development and ecogeotechnology of deposit development. 2015: 360 (In Russ.)].
6. Технично-экономический расчёт вскрытия и подготовки II горизонта шахты «Воргашорская» ПО «Воркутауголь». т. 1, кн.1. ГИПРО-ШАХТ. 1988. (внутренняя документация компании). [Technical and economic calculation of opening and preparation of the 2nd horizon of the Vorgashorskaya mine of the Vorkutaugol Production Association. Vol. 1, Book 1. GIPROSHAKHT. 1988 (internal documentation of the company) (In Russ.)].
7. Технологические схемы проведения выработок при многоштрековой подготовке выемочных участков на шахтах ОАО «Воркутауголь». СПГИ (ТУ) «Воркутинский горный институт». Воркута, 2007. (внутренняя документация компании). [Technological schemes for conducting workings during multi-entry preparation of extraction sections in the mines of ОАО Vorkutaugol. SPGGI (TU) Vorkuta Mining Institute. Vorkuta, 2007. (internal documentation of the company) (In Russ.)].
8. Руководство по расчёту параметров крепления сопряжений лав с примыкающими выработками при применении стоечной и анкерной крепи на шахте «Воргашорская». ВНИМИ, 1998 (внутренняя документация компании). [Guidelines for calculating the parameters of fastening the junctions of longwall faces with adjacent workings using rack and anchor support at the Vorgashorskaya mine. VNIMI, 1998. (internal documentation of the company) (In Russ.)].
9. Еременко ВА, Лушников ВН, Сэнди М, и др. Обоснование и выбор технологии проведения и способов крепления горных выработок в неустойчивых горных породах на глубоких горизонтах Холбинского рудника. *Горный журнал*. 2013;7:59–66. [Eremenko VA, Lushnikov VN, Sandy M, et al. Justification and selection of technology for conducting and methods of supporting mine workings in unstable rocks at deep horizons of the Kholbinsky mine. *Mining Journal*. 2013;7:59–66 (In Russ.)].
10. Dyomin V, Batyrkhanova AT, Tomilov A, et al. Developing technological schemes of driving workings with controlled resistance of contours. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019;3:22–8. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/2>.
11. Song G, Chugh YP, Wang J. A numerical modelling study of longwall face stability in mining thick coal seams in China. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2017;8(1):35–55. <https://doi.org/10.1504/IJMMME.2017.10003216>.
12. Говорухин ЮМ, Риб СВ, Никитина АМ, и др. Моделирование численными методами процессов обрушения пород кровли. *Горный журнал*. 2019;4:23–6. [Govorukhin YuM, Rib SV, Nikitina AM, et al. Numerical modeling of roof rock collapse processes. *Mining Journal*. 2019;4:23–26 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.04.05>.
13. Ройтер М, Крах М, Кислинг У, и др. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг очистных выработок. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015;2:46–52. [Reuter M, Krach M, Kisling U, et al. Zonal disintegration of rocks around stopes. *Physical and technical problems of mineral development*. 2015;2:46–52 (In Russ.)].
14. Экгардт ВИ, Кравчук ИЛ, Неволлина ЕМ. Отечественный опыт работы без смертельных травм на угледобывающем предприятии. *Безопасность труда в промышленности*. 2019;7:67–73. [Eckhardt VI, Kravchuk IL, Nevolina EM. Domestic experience of work without fatal injuries at a coal mining enterprise. *Occupational Safety in Industry*. 2019;7:67–73 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-7-67-73>.
15. Калмыков ВН, Латкин ВВ, Неугомонов СС, и др. Промышленные испытания новых видов крепи при строительстве горных выработок на рудниках Уральского региона. *Уральский промышленник*. 2015;1:4–8. [Kalmykov VN, Latkin VV, Neugomonov SS, et al. Industrial testing of new types of support in the construction of mine workings in the Ural region. *Ural Industrialist*. 2015;1:4–8 (In Russ.)].
16. Тимошенко АИ. Экономическое развитие Сибири как результат государственной стратегии, направленной на индустриальную модернизацию СССР. *Историко-экономические исследования*. 2018;19(1):91–118. [Timoshenko AI. Economic development of Siberia as a result of the state strategy aimed at industrial modernization of the USSR. *Historical and economic studies*. 2018;19(1):91–118 (In Russ.)].
17. Писаренко ПИ. Строительство уклона в сложных геодинамических условиях шахты «Скалистая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» со специальной частью «Повышение надежности металлической арочной крепи [Электронный ресурс]: дипломный проект специалиста: 21.05.04. Красноярск: СФУ, 2016. URI: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/27373> [Pisarenko, Petr Ivanovich. Construction of an incline in complex geodynamic conditions of the Skalista mine, ZF of PAO MMC Norilsk Nickel, with a special part “Improving the reliability of metal arch support [Electronic resource]: specialist’s diploma project: 21.05.04. Krasnoyarsk: SFU, 2016. URI: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/27373>].
18. Грибанов АМ. «Обеспечение безопасности при ведении основных технологических процессов на шахте «Березовская»: дипломный проект; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ (ЮТИ ТПУ); Томск, 2016. Электронный ресурс: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/29600> [Gribanov AM. “Ensuring safety during the main technological processes at the Berezovskaya mine”: diploma; National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Yurginsky Technological Institute (branch) of TPU (UTI TPU). Tomsk, 2016. Electronic resource: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/29600>].



19. Yang S, Li Q, Yue H, et al. Study on roof deformation and failure law of close distance coal seams mining based on digital image correlation. *Experimental Techniques*. 2024;48(6):1-22. <https://doi.org/10.1007/s40799-024-00717-w>.
20. Wang P, Nong Zh, Kan J, et al. Instability mode and control technology of surrounding rock in composite roof coal roadway under multiple dynamic pressure disturbances. *Geofluids*. 2022;2022(1):8694325. <https://doi.org/10.1155/2022/8694325>.
21. Бейсембаев КМ, Малыбаев НС, Тутанов СК, и др. Разработка модели лавы для системы управления механизированной крепью с обратной связью. *Горный журнал*. 2019;8:38-43. [Beisembaev KM, Malybaev NS, Tutanov SK, et al. Development of a longwall model for a mechanized support control system with feedback. *Mining Journal*. 2019;8:38-43 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.08.07>.
22. Жетесова ГС, Бейсембаев КМ, Нокина ЖН. Моделирование камерной выемки с уступной формой забоя. *Уголь*. 2021;1:14-20. [Zhetesova GS, Beisembaev KM, Nokina ZhN. Modeling of chamber mining with a stepped face shape. *Coal*. 2021;1:14-20 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-1-14-20>.
23. Бейсембаев КМ, Жетесова ГС, Малыбаев НС, и др. Евразийский патент № 031964 В1. Секция шагающей крепи. Патентообладатель Бейсембаев К.М. 2019. Бюл. 3. [Beisembaev KM, Zhetesova GS, Malybaev NS, et al. Eurasian Patent No. 031964 B1. Walking support section. Patent holder Beisembaev K.M. 2019. Bulletin 3 (In Russ.)].
24. Жетесова ГС, Бейсембаев КМ, Нокина ЖН, и др. Программирование, управление и цифровые модели забоев газозольных шахт. 2020: 176. [Zhetesova GS, Beisembaev KM, Nokina ZhN, et al. Programming, control and digital models of coal and gas mine faces. 2020: 176 (In Russ.)].
25. Peter K, Moshood O, Akinseye PO, et al. An overview of the use of rockbolts as support tools in mining operations. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022;40:1637-61. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-02005-5>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### Александр Николаевич Анушенков -

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Сибирский Федеральный Университет, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: AAnushenkov@sfu-kras.ru

### Николай Викторович Фирсов -

аспирант, Сибирский Федеральный Университет, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: kolya-firsov-86@mail.ru

## ABOUT THE AUTHORS

### Alexander N. Anushenkov -

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: AAnushenkov@sfu-kras.ru

### Nikolay V. Firsov -

Graduate student, Head of Department, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: kolya-firsov-86@mail.ru

### Критерии авторства / Contribution:

Фирсов Н. В. - разработал основную идею исследования, провел аналитическую часть и подготовил черновик статьи; Анушенков А. Н. - обеспечил методологическую поддержку, провел научное редактирование и осуществил общее руководство проектом. / Firsov N. V. - developed the main idea of the study, conducted the analytical part and prepared a draft of the article; Anushenkov A. N. - provided methodological support, conducted scientific editing and carried out the overall management of the project.

### Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.02.2025.

Поступила после рецензирования: 18.03.2025.

Принята к публикации: 01.05.2025.

### Article info

Received: 11.02.2025.

Revised: 18.03.2025.

Accepted: 01.05.2025.