



УДК 622.831

МЕТОДОЛОГИЯ СНИЖЕНИЯ УДАРООПАСНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ КАМЕРНО-СТОЛБОВОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ СЕВЕРОУРАЛЬСКИХ БОКСИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Д.В.СИДОРОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрен практический опыт применения камерно-столбовой системы разработки (КССР) в условиях больших глубин и динамического проявления горного давления. Установлено, что способы управления горным давлением, эффективные на верхних горизонтах, не удовлетворяют безопасности производства работ на современных глубинах, что обусловлено изменением характера геодинамических процессов при отработке рудной залежи. С увеличением глубины отработки наблюдается рост интенсивности геодинамических процессов и количества случаев разрушения целиков и кровли очистных камер. При горных работах на глубине 800 м разрушения горных конструкций приобрели массовый и непредсказуемый характер, что потребовало разработки и реализации концепции по оценке соответствия применяемых параметров конструктивных элементов КССР горно-геологическим, горно-техническим и геодинамическим условиям Североуральских бокситовых месторождений и разработки рекомендаций по безопасному применению КССР в удароопасных условиях на больших глубинах.

Выявлены причины разрушения выработок и элементов горных конструкций от влияния природных и техногенных факторов, определены объекты угроз и геомеханического обеспечения. Выполнена оценка соответствия применяемых методов расчета параметров конструктивных элементов КССР, прогноза и мер по предупреждению горно-тектонических ударов существующим формам и условиям их проявления на рудниках ОАО «Севералбокситруда». Рассмотрены вопросы модернизации известного и разработки нового геомеханического обеспечения КССР с учетом влияния природных и техногенных угроз. Представлены результаты экспериментальной проверки новых параметров конструктивных элементов КССР на шахтах СУБРа. Приведены данные о промышленном внедрении на шахтах СУБРа разработанных нормативно-методических документов по определению допустимых параметров конструктивных элементов КССР на больших глубинах.

Ключевые слова: методология, методическое обеспечение, программное обеспечение, прогнозирование, камерно-столбовая система разработки, Североуральские бокситовые месторождения, напряженно-деформированное состояние, удароопасность, большая глубина

Как цитировать эту статью: Сидоров Д.В. Методология снижения удароопасности при применении камерно-столбовой системы разработки Североуральских бокситовых месторождений на больших глубинах // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 58-69. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.58

Введение. Для обеспечения стабильности геополитической и экономической безопасности России реализуется единая государственная политика (Стратегия развития металлургической промышленности России на период до 2020 г., утверждена приказом Минпромторга России от 18 марта 2009 г. № 150) в решении проблемы динамичного развития горно-металлургической промышленности, основным направлением которой является решение проблем по развитию сырьевой базы.

Концептуальные и методологические подходы к поиску стратегических путей решения подобных проблем горного производства в разные годы разрабатывались ведущими академическими и отраслевыми научно-исследовательскими институтами под руководством известных ученых: К.Н.Трубецкого, Н.Н.Мельникова, Д.Р.Каплунова, В.Н.Опарина, А.Г.Протосени, А.А.Еременко, Б.А.Картозии, И.М.Петухова, Ю.П.Галченко, М.А.Иофиса и др., свидетельствующих о необходимости проведения комплексных научно-исследовательских работ по развитию способов повышения промышленной безопасности и экономической эффективности разработки месторождений полезных ископаемых в связи с ухудшением горно-геологических, горно-технических, геомеханических и геодинамических условий на больших глубинах.

Региональным проблемам и перспективам развития горно-добывающего комплекса посвящены многочисленные работы под руководством известных ученых Северо-Западного региона: Н.Н.Мельникова, А.А.Козырева и др., Уральского региона: Д.Р.Каплунова, А.Д.Сашурина и др., Сибирского региона: М.В.Курлени, В.Н.Опарина, А.А.Еременко, Б.В.Шреппа, П.В.Егорова, А.М.Фрейдина, В.А.Еременко и др., Дальневосточного региона: И.Ю.Рассказова и др., отражающие результаты многолетних научных исследований, выполненных на рудниках, разрабатывающих удароопасные месторождения в различных горно-геологических, горно-технических и геомеханических условиях.



Обзор публикаций авторов показал, что, несмотря на существенные различия условий разработки месторождений, для обеспечения их геодинамической безопасности, как правило, используется схожий комплекс прогнозно-профилактических мероприятий [3]. Вместе с тем из-за специфичности условий разработки месторождений критерии удароопасности для каждого месторождения (группы месторождений) устанавливаются раздельно [3]. Авторы также обращают внимание на необходимость развития методов прогноза и контроля напряженно-деформированного состояния и удароопасности массива горных пород, а также расчетных методов для определения безопасных параметров конструктивных элементов систем разработки месторождений хрупких удароопасных руд в условиях высоких концентраций природного и техногенного полей напряжений, обусловленных ростом глубины горных работ, размеров выработанных пространств и тектонической нарушенности месторождений.

Особую актуальность эта проблема приобрела на шахтах СУБРа [3], разрабатывающих опасные по горным ударам Североуральские бокситовые месторождения КССР, относящиеся к наиболее эффективным системам подземной разработки пологопадающих месторождений и достигающие 90 % в общей добыче руды на шахтах СУБРа. При этом основной особенностью КССР является поддержание очистного пространства целиками, препятствующими обрушению покрывающей толщи. Безопасные условия труда и безаварийность работ при применении КССР обеспечиваются устойчивостью обнажений кровли очистных камер и междукамерных целиков, зависящей от правильности определения их параметров (пролетов кровли камер, размеров целиков).

Особенно большое значение параметры КССР приобретают при разработке месторождений полезных ископаемых с покидаемыми навсегда опорными междукамерными целиками (столбами). Это связано с тем, что при оставлении в выработанном пространстве междукамерных целиков с большими, чем необходимо, размерами появляются дополнительные потери полезного ископаемого. Но если размеры междукамерных целиков недостаточны для поддержания кровли покрывающих пород, то последствия в результате их разрушения приобретают аварийный или катастрофический характер с разрушением элементов горных конструкций и травмированием горнорабочих, что зачастую приводит к серьезным социально-экономическим проблемам.

Применение КССР в удароопасных условиях требует дополнительного учета специфических особенностей, связанных с проявлением горного давления в динамической форме (горных ударов). При этом рассмотрение практического опыта применения КССР на шахтах СУБРа показало, что в условиях больших глубин и динамического проявления горного давления способы управления горным давлением, эффективные на верхних горизонтах, не удовлетворяют безопасности производства работ на современных глубинах, что обусловлено изменением характера геодинамических процессов при отработке рудной залежи. По мере увеличения глубины отработки наблюдался рост интенсивности геодинамических процессов и количества случаев разрушения целиков и кровли очистных камер. При достижении горными работами глубины 650-700 м интенсивность проявления горных ударов резко возросла [4, 5], а разрушения горных конструкций стали носить массовый и непредсказуемый характер, что потребовало разработки и реализации многолетней программы НИР по оценке соответствия применяемых параметров конструктивных элементов КССР горно-геологическим, горно-техническим и геодинамическим условиям Североуральских бокситовых месторождений и разработки рекомендаций по безопасному применению КССР в удароопасных условиях на больших глубинах.

Для разработки рекомендаций по снижению удароопасности на шахтах СУБРа была разработана концепция развития геомеханического обеспечения КССР (рис.1).

Реализация I этапа. Североуральские бокситовые месторождения относятся к группе сложного геологического строения (Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых от 11.12.2006. № 278), характеризующейся наличием крупных тектонически нарушенных карсто-пластообразных залежей с выровненной кровлей и неровной подошвой, с изменчивой мощностью.

Рудный горизонт подразделяется на два горизонта: нижний – красных марких, немарких и яшмовидных бокситов и верхний – пестроцветных пиритизированных бокситов. В основном преобладают красные маркие и немаркие бокситы (около 80 %). Яшмовидные бокситы разбиты кливажными трещинами на отдельные плитки различных размеров. Прочность бокситов на сжатие изменяется в широком диапазоне: боксит красный маркий (БКМ) – разновидность мягких



Рис. 1. Концепция снижения удароопасности при применении КССР на больших глубинах

бокситовых руд с прочностью на сжатие 20 МПа; боксит красный немаркий (БКМ) – разновидность средних по прочности бокситовых руд с прочностью на сжатие 40 МПа; боксит пестроцветный (БП) – разновидность прочных бокситовых руд с прочностью на сжатие 80 МПа. Мощность рудной залежи изменяется от нескольких сантиметров до 20 м и более. Тектоника Североуральских бокситовых месторождений отличается большим количеством дизъюнктивов различного возраста образования и многообразием форм их проявлений. Блочное строение Североуральских бокситовых месторождений обуславливает неравнокомпонентное распределение исходного поля напряжений, в целом составляющее соотношение главных напряжений 1:0,6:0,5. В то же время по шахтным полям соотношения нормальных главных напряжений несколько отличаются и имеют следующие параметры: Красная Шапочка (Восточная залежь) – 1:0,6:0,5; Кальинское – 1:0,7:0,5; Ново-Кальинское – 1:0,8:0,6; Черемуховское – 1:0,7:0,6.

Особое значение проблема удароопасности приобретает при применении камерно-столбовой системы разработки, предполагающей формирование в выработанном пространстве значительного количества различных по размерам опор, являющихся концентраторами напряжений. В соответствии с [3] Североуральские бокситовые месторождения отнесены с глубины 250 м к опасным по горным ударам и считаются одними из наиболее удароопасных среди известных рудных месторождений в мире [8]. По состоянию на начало 2014 г. на шахтах СУБРа при применении КССР расследовано 216 горных ударов с разрушением горных выработок и элементов горных конструкций.

Сейсмостанция «Североуральск» ежегодно регистрирует около 1000 сейсмических явлений, включающих горные и горно-тектонические удары с различной по величине энергией (10^2 - 10^{10} Дж). По мере увеличения глубины разработки начали проявляться мощные удары горно-тектонического типа с энергией 10^8 - 10^{10} Дж, регистрируемые в радиусе более 500 км государственной сейсмической сетью наблюдения [8].



Оценка удароопасности шахтных полей месторождений Североуральского бокситового бассейна, основанная на обработке данных карточек горных ударов, показала, что они существенно отличаются по степени опасности. При этом наиболее удароопасными являются месторождения «Красная Шапочка» в пределах поля шахты № 14-14 бис и Южно-Кальинский участок месторождения «Кальинское» в пределах поля шахты «Кальинская», а меньшую опасность представляют месторождение «Черемуховское» и южный участок месторождения «Красная Шапочка», находящийся в пределах поля шахты № 16-16 бис.

К удароопасным относятся породы и руды, склонные к накоплению потенциальной энергии и хрупкому разрушению: порфириты, брекчии, туфобрекчии, туфопесчаники, подстилающие и покрывающие известняки, а также породы различного литологического состава. Удароопасными рудами являются следующие разновидности бокситов: красный немаркий, яшмовидный, пестроцветный, обесцвеченный, а также переходные формы красного немаркого и маркого бокситов.

Оценка частоты проявления горных ударов в простых и сложных горно-геологических условиях показывает, что их подавляющее большинство произошло при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях. Одним из факторов, приводящим к проявлению горных ударов, является неоднородное литологическое строение рудной залежи, как в разрезе, так и по площади оруденения. Одним из сопутствующих факторов, приводящих к формированию неоднородного поля напряжений и различным условиям нагружения краевой части массива горных пород и, как следствие, к проявлению горного давления в динамической форме, является невыдержанная мощность рудной залежи. Анализ случаев проявления горных ударов в сложных горно-геологических условиях, характеризующихся наличием участков рудной залежи с резким уменьшением ее мощности, показывает, что из 36 зафиксированных горных ударов 10 произошли при однородном строении залежи, а наибольшее количество ударов (26) произошло на участках, дополнительно осложненных неоднородным литологическим строением рудной залежи. Наиболее опасными по проявлению горных ударов являются безрудные зоны, участки резкого изменения мощности рудной залежи, участки уменьшения мощности рудной залежи до 4,0 м, зоны влияния тектонических нарушений, контакты смены литологических разностей руд и пород [6, 7].

Существенное влияние на проявление горных ударов оказывает тектоническая нарушенность рудной залежи, характеризующаяся широким диапазоном параметров тектонических нарушений (свойства пород шва, амплитуда разрыва, угол падения плоскости сместителя и др.) и приводящая к формированию обособленных участков рудной залежи с концентраторами повышенного напряженного и удароопасного состояния.

Анализ случаев проявления горных ударов на участках, осложненных тектоническими нарушениями, показывает, что рост глубины разработки приводит к значительному увеличению количества горных ударов на участках крупно-амплитудных тектонических нарушений (КАТН) – 28 горных ударов по сравнению с участками мелко-амплитудных тектонических нарушений (МАТН) – 14 горных ударов. Это объясняется формированием условий нагружения сместителей КАТН, достаточных для возникновения значительных площадей подвижек горных пород по развитым плоскостям сместителей КАТН (явления сдвигового типа), способствующих высвобождению большого количества запасенной упругой сейсмической энергии. Снижение количества горных ударов на участках МАТН с ростом глубины горных работ, главным образом, связано с более спокойным разрушением неразвитых плоскостей сместителей МАТН в зоне предельно-напряженного состояния краевой части рудной залежи в результате перераспределения опорного давления от очистных работ. Полученные результаты оценки проявления горных ударов на участках МАТН и КАТН на больших глубинах позволяют уточнить выводы ученых ВНИМИ и специалистов СУБРа, в которых отмечается, что абсолютное большинство динамических проявлений происходит у мелкоамплитудных тектонических нарушений с амплитудой смещения до 5 м.

Проявление горных ударов в результате бурения взрывных шпуров, как правило, связано либо с наличием прочных разновидностей бокситовых руд с максимальными напряжениями, действующими на кромке краевой части рудной залежи и разгружающихся при незначительном механическом воздействии бурового инструмента, или с недостаточностью времени для релаксации напряжений между циклами взрывных работ и бурения взрывных шпуров. Проявление



горных ударов в результате уборки руды или в выходные дни, как правило, связано с перераспределением нагрузок после взрывных работ на участки с более прочными разновидностями бокситовых руд и сложным характером их разрушения во времени.

Кроме вышеперечисленных причин проявления горного давления в динамической форме на современных глубинах ведения горных работ очевидно преобладание такого горно-технического фактора, как размеры выработанного пространства и соотношение площадей опор и обнажений кровли в пределах отдельной выемочной единицы (блока). Специалистами СУБРа было выявлено, что возрастание удароопасности массива горных пород напрямую связано с увеличением площадей обнажения кровли. Оставляемые в выработанном пространстве опорные целики, постепенно пригружаясь, по мере увеличения площади обнажения покрывающих пород, начинали разрушаться как в статической, так и в динамической форме. Часть нагрузки от подработанных покрывающих пород, ранее поддерживаемой целиками, передавалась на краевую часть рудной залежи, в которой ведутся очистные работы. При этом возникали неуправляемые деформации в кровле, заломы пластов, их подвижки. Чаще всего они реализовывались в виде толчков в кровле, которые, в свою очередь, приводили к разрушению отдельных или группы целиков. Для глубин 1000-1200 м величины безопасных пролетов по падению 55-75 м [14].

Резкий рост удароопасности на глубинах 650-700 м потребовал принятия новых технологических решений, направленных на повышение безопасности применения КССР. Суть технологических решений заключалась в том, чтобы различными вариантами размещения естественных опор (безрудных участков), барьерных и опорных целиков сократить размеры выемочных участков. В рамках опытно-промышленных испытаний СУБРа, ВНИМИ и Унипромедь на наиболее удароопасных участках полей шахт 14-14 бис и Кальинская, отработка которых традиционными схемами и с конструктивными параметрами КССР, рассчитанными в соответствии с Техническим проектом «Камерно-столбовая система разработки для шахт СУБРа» (1977 г.), была крайне затруднительна, были испытаны варианты КССР: с оставлением рудных барьерных целиков с последующей их отработкой системами без присутствия горнорабочих в очистном пространстве; с формированием ленточных опорных целиков с расположением их длинной осью по восстанию; с формированием ленточных целиков без их последующей разрезки; с увеличением размеров рудных опорных целиков относительно их расчетных величин; с уменьшением пролетов очистных камер.

Из вышеизложенного следует, что основными природными факторами, представляющими угрозу для безопасного применения КССР на шахтах СУБРа являются: блочное строение горного массива, связанное с тектонической нарушенностью с разными условиями нагружения пород швов сместителей; наличие безрудных зон и зон непромышленного оруденения (жестких опор) различной по площади и конфигурации с хаотичным расположением в пределах шахтных полей; резкие изменения (невыдержанность) мощности рудной залежи как по падению, так и по простиранию; наличие и бессистемное расположение в пределах шахтных полей руд с различными физико-механическими и деформационными характеристиками.

Основными техногенными факторами, представляющими угрозу для безопасного применения КССР, главным образом, являются: значительные площади выработанного пространства, а также необрушенных пород; неравномерное понижение (опережение) фронта очистных работ; изрезанность рудного массива передовыми выработками; расположение выработок и их сопряжений в зоне влияния очистных работ и природных концентраторов напряжений.

В результате детального анализа природных и техногенных угроз были выявлены объекты геомеханического обеспечения КССР, влияющие на безопасные условия ее применения в рассматриваемых условиях и требующие геомеханического обоснования: выработанные пространства в части определения допустимых пролетов с учетом удароопасности рудной залежи и разупрочнения междукамерных целиков в выработанном пространстве; очистные камеры в части определения допустимых пролетов между краями междукамерных целиков с учетом совместного деформирования кровли и разупрочненных междукамерных целиков; барьерные целики в части определения допустимой ширины с учетом их удароопасности и разупрочнения междукамерных целиков в выработанном пространстве; междукамерные целики в части определения их допустимой ширины с учетом их разупрочнения и динамической пригрузки, а также с учетом возможной дифференциации следующих дополнительных условий: глубины работ, прочностных и упругих свойств руды и вмещающих пород, мощности и угла падения рудной залежи, тектонической составляющей.



Реализация II этапа. До внедрения рекомендаций выбор параметров КССР осуществлялся на основании Руководства по выбору конструктивных параметров камерно-столбовой системы разработки на шахтах ОАО «Севуралбокситруда» (Екатеринбург – Североуральск, 1997). При анализе методики расчета размеров междукамерных целиков были выявлены физические противоречия, заключающиеся в том, что использование теории свода естественного равновесия в условиях СУБРа, разрабатывающего хрупкие прочные разновидности бокситовых руд, не склонных к существенным пластическим деформациям, является правомочным либо в случае разрушения междукамерных целиков, или в результате придания им искусственной податливости. В Руководстве данные деформационные процессы не были учтены и междукамерные целики рассматривались как упругие несущие тела, характеризующиеся истинным пределом прочности руды с дополнительным введением коэффициента запаса прочности. Несмотря на определенные противоречия при небольших глубинах горных работ методика позволяла получать удовлетворительные результаты благодаря значительной прочности рудных целиков. Однако искусственное ограничение реального веса покрывающих пород на междукамерные целики при достижении их несущей способности стало приводить к аварийному хрупкому разрушению целиков. Анализ методики определения параметров барьерных целиков на шахтах СУБРа показал, что, несмотря на использование эффективной теории предельного равновесия, без внимания остался фактор удароопасности.

Анализ отечественного опыта расчета целиков, представленного в публикациях Л.Д.Шевякова, В.Д.Слесарева, Г.Е.Гулевича, С.Г.Авершина, Ю.М.Либермана, Н.А.Давыдовой, В.Р.Рахимова, Ц.Гомеса, К.В.Руппнейта, В.Д.Паляя, С.В.Ветрова, Ю.А.Модестова, В.В.Соколовского, В.Ф.Трумбачева, Е.А.Мельникова, Ф.П.Бублика, Г.Л.Фисенко, Ж.С.Ержанова, А.К.Черникова, В.И.Борщ-Компоницеца, А.Б.Макарова, показал, что исследования, главным образом, были направлены на поиск путей обеспечения длительной устойчивости целиков, необходимой для надежного поддержания кровли пород и капитальных горных выработок. При этом ряд авторов отмечает, что увеличение глубины ведения горных работ и рост объемов выработанного пространства сопровождаются активизацией геодинамических процессов и приводят к появлению более мощных геодинамических явлений – горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений.

Достаточно подробный обзор зарубежных методов определения параметров целиков изложен в обобщающих работах М.Таваколи [26] и В.Г.Мейби [21]. Анализ работ М.Таваколи и В.Г.Мейби показывает, что основным критерием выбора параметров целиков является коэффициент безопасности (safety factor), характеризующий отношение величины экспериментальных напряжений, определяемых с использованием эмпирических методов, к величине расчетных напряжений. Для расчета прочности широко применяется критерий Нойек-Браун [19]. Безопасные параметры целиков достигаются при величине коэффициента безопасности более единицы. В зарубежной горно-добывающей промышленности эмпирические методы, как правило, базируются на ре-анализе результатов оценки напряженного состояния и устойчивости целиков, сформированных в выработанном пространстве, в результате которого для конкретных горно-геологических и горно-технических условий разработки находят значения параметров (предел кубиковой прочности руды, ширину и высоту целика, корректирующие ширину и высоту целика константы), входящих в эмпирическую формулу, для определения напряженного состояния целиков [15, 17]. Результаты исследований различных механических состояний целиков нашли отражение в работах [20, 22]. Для расчетной оценки напряженного состояния целиков, располагающихся по равномерной сетке, главным образом используется метод Турнера, позволяющий оперативно определять равномерно распределенную нагрузку на целики от веса всей покрывающей толщи горных пород [16, 18].

Развитие эффективных численных методов (граничных элементов, конечных элементов и конечных разностей) и компьютерных технологий привело к широкому использованию численного моделирования для оценки напряженного состояния и определения параметров упругих целиков в более сложных случаях (неравномерная сетка расположения целиков, переменная мощность и прочность целиков и другие факторы). Для численной оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород наибольшую популярность получили метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ). Преимущество МКЭ заключается в слабой чувствительности метода к усложнению геометрии и механических свойств горных



пород. Однако, несмотря на его универсальность, применение МКЭ для задач, где имеются области резкого изменения величин напряжений и смещений, например в краевых частях рудной залежи и целиков, связано с серьезными проблемами обеспечения удовлетворительной точности в указанных областях. Преимущества МГЭ заключаются в уменьшении размерности задачи и количества исходной информации, а также достижении высокой точности решений в областях с большими градиентами напряжений.

В работе [1] была показана перспективность использования различных форм МГЭ применительно к проблемам геомеханики разработки угольных месторождений, а также представлены результаты моделирования напряженного состояния как свиты, так и одиночных угольных пластов из допущения их абсолютной жесткости с применением разработанных во ВНИМИ компьютерных программ SHWARTZ, SUIT2D, SUIT3D, LAY3D, базирующихся на реализации различных форм ГИУ. Систематические комплексные исследования в области разработки теории и практики борьбы с геодинамическими явлениями позволили разработать численный метод на основе специальной формы гиперсингулярных интегральных уравнений и компьютерную программу FAULT3D [2] по расчету естественного поля напряжений в блочном массиве горных пород. При расчетах на контактах между блоками задавались условия полного сцепления, кроме участков, на которых были инструментально зафиксированы подвижные разломы, т.е. отвечающие режиму полного проскальзывания. Для оценки напряженно-деформированного состояния рудной залежи и целиков с совокупным учетом произвольной пространственной конфигурации краевой части рудной залежи, естественной (неоднородное литологическое строение и сложная морфология залежи) и техногенной (параметры скважинной разгрузки) податливости рудной залежи и целиков была разработана специальная форма ГИУ и компьютерная программа PRESS3D [10].

Поскольку подземная разработка месторождений СУБРа характеризуется формированием сложной пространственной геометрии фронта работ, то при оценке возможности применения существующего программного обеспечения для прогнозирования горно-тектонических ударов и параметров профилактических мероприятий в условиях СУБРа рассматривались геомеханические компьютерные программы, позволяющие решать объемные задачи теории упругости. Из зарубежных программ, реализующих МКЭ, можно отметить следующие: ABAQUS, ADINA, ANSYS3D, BEFE, DIANA, ELFEN, FLAC3D, MIDASGTS3D, PENTAGON3D, PLAXIS3D, SIGMA3D, SIGMA/W, SVSLOPE, TOCHNOG, из отечественных: НЕДРА3Д (Санкт-Петербургский горный университет), SIGMAGT (Горный институт КНЦ РАН). Из зарубежных программ, реализующих метод ГИУ, можно отметить следующие: EXAMINE3D, из отечественных: FAULT3D, PRESS3D (Санкт-Петербургский горный университет).

Основной проблемой эффективного применения геомеханических расчетных программных комплексов является сложность построения исходной информационной геолого-структурной модели рудной залежи [23]. Главным образом это связано с необходимостью дифференцированного учета в модели следующих геоинформационных данных: пространственного залегания и формы рудной залежи, а также широкого диапазона свойств расчетных элементов, включающих геометрические параметры (ширину, длину, высоту), физико-механические свойства руд (пород), параметры тектонических нарушений и профилактических мероприятий. При этом, поскольку количество исходных данных, как правило, ограничено, возникает необходимость в интерполировании их значений.

Для решения подобных задач в мировой практике наиболее широкое распространение получили методы IDW и TIN, используемые известными популярными геоинформационными системами: ArcGIS компании «ESRI, GeoMedia» корпорации «Intergraph», MapInfo Professional компании «Pitney Bowes MapInfo» и др. для построения различных поверхностей по набору точек данных. Качество результата при применении метода IDW существенно зависит от равномерности распределения точек исходных данных и, следовательно, для условий СУБРа с весьма нерегулярной сетью исходных данных будет давать существенную погрешность. Для построения поверхности по нерегулярной триангуляционной сети TIN применяют метод интерполяции Делоне. В связи со сложностью геологического строения Североуральских бокситовых месторождений, характеризующихся резкими градиентами значений исходных данных как в разрезе, так и по площади залежи, применение метода интерполяции TIN позволит уменьшить искажение расчетной модели.



Оценка эффективности и достаточности применяемых методов прогноза горных и горно-тектонических ударов показала, что на шахтах СУБРа локальный и региональный прогноз удароопасности участков рудного и породного массивов применяются в соответствии с требованиями [3].

Анализ нормативно-методической документации показывает, что локальные методы прогноза предназначены для определения категории удароопасности выработок или отдельных участков массива горных пород (руд). Локальный прогноз выполняется участками ППГУ (прогноза и предупреждения горных ударов) шахт одним из геомеханических или геофизических методов или, в отдельных случаях, комплексом методов. К геомеханическим методам локального прогноза, применяемым в настоящее время на шахтах СУБРа, относятся: метод по дискванию керна при бурении скважин и метод по вдавлению пуансона в стенки шпура (скважины) прибором МГД; к геофизическим – метод, основанный на регистрации акустической эмиссии (АЭ) с помощью аппаратуры типа СБ-32.

Оценивая эффективность локальных методов прогноза, следует четко представлять их назначение. А именно – выявление удароопасных участков, сформированных в результате концентрации повышенных напряжений в краевых частях очистных, подготовительных и капитальных выработок. Область действия этих методов распространяется на участки прилегающих к выработкам массивов в зоне опорного давления. В соответствии с назначением этих методов оценка производится на глубину, позволяющую оценить уровень напряжений в краевой части в зоне их максимума, т.е. обычно на расстоянии 3-4 м. Так, согласно имеющимся оценкам, широко применяемые на шахтах СУБРа оперативные методы геофизического прогноза основываются на зондировании массива в краевых частях на глубину до 5 м.

Для регионального прогноза удароопасности шахтные поля СУБРа покрыты сетью сейсмоконтроля, что позволяет выполнять оценку поля напряжений в районе очага разрушения, установления наличия сдвиговых деформаций и характера подвижек в массиве. Основные достоинства данного метода: непрерывность наблюдений, возможность выявления зон активизации деформационных процессов в массиве и контроля за их эволюцией во времени, получение информации в точках массива, недоступных для всех других методов; недостатки: невозможность текущей оценки критического состояния исследуемого участка по аппаратурным данным и низкая эффективность прогноза сейсмопроявлений высокого энергетического уровня, характерных для горно-тектонических ударов. В целом данные регионального прогноза позволяют отслеживать тенденции в развитии удароопасной обстановки на шахтах и выделять потенциально опасные участки, в том числе и по проявлению горно-тектонических ударов. Однако количественные критерии для оценки опасности горно-тектонических ударов данным методом отсутствуют (равно как и существующими на настоящее время другими методами).

Предупреждение горных и горно-тектонических ударов на шахтах СУБРа базируется на комплексном применении мероприятий по разгрузке массива горных пород в соответствии с требованиями [3] и в целом позволяет эффективно воздействовать как на краевые части выработок для снятия опасных напряжений, так и на напряженные массивы вмещающих пород. Применение региональных разгрузочных мероприятий (площадная разгрузка массива, разгрузка по швам активных тектонических нарушений) позволяет на определенное время разгружать участки массивов в тектонически напряженных зонах в районах ведения очистных работ. Взрывные мероприятия могут иметь следующий недостаток: если взрывная волна не сорвет «замок» и не даст разгрузку по тектонике, ситуация может ухудшиться за счет перераспределения напряжений и дополнительной пригрузки периферийных к разгружаемому участкам. Очевидной является необходимость продолжения работ по совершенствованию профилактических мероприятий в блоках с активной тектоникой и оценке их эффективности. Это связано с тем, что в настоящее время отсутствуют достаточно обоснованные расчетные методы оценки напряженно-деформированного и удароопасного состояния массива горных пород при ведении горных работ в зонах влияния нарушений, позволяющие принимать безопасные технические решения по перспективному планированию развития горных работ, выбору параметров систем разработки и профилактических мероприятий с учетом тектонической нарушенности участков шахтных полей, напряженно-деформированного состояния в блоках на разных стадиях их отработки, условий проскальзывания по сместителям нарушений и ожидаемых притоков энергии при подвижке блоков.



Из вышеизложенного следует, что в ранее действующих нормативно-методических документах, регламентирующих применение КССР, на шахтах СУБРа отсутствуют положения по определению: допустимых размеров выработанных пространств; ширины барьерных целиков с учетом фактора удароопасности; ширины междукамерных целиков с учетом процесса их разрушения; отсутствует методическое и программное обеспечение для перспективного (заблаговременного) прогнозирования удароопасности рудной залежи и целиков и определения оптимальных параметров профилактических мероприятий.

Реализация III этапа. Для восполнения пробела в геомеханическом обеспечении КССР применительно к большим глубинам отработки запасов месторождений СУБРа были разработаны:

- метод расчета параметров междукамерных столбчатых и ленточных целиков, отличающихся от известных решений совокупным учетом глубины горных работ; размера выработанного пространства (расстояния между жесткими опорами); расстояний между краями междукамерных целиков (пролетов кровли очистных камер); мощности рудной залежи; модуля упругости вмещающих пород, модуля деформации и предела остаточной прочности руды (изменения механического состояния целиков в результате разрушения); удельного веса вмещающих пород, углов полных сдвижений подработанных пород с учетом наличия в выработанном пространстве междукамерных целиков, также тектонической составляющей природного поля напряжений [12];

- метод расчета допустимых размеров выработанных пространств, отличающегося от известных решений совокупным учетом глубины ведения очистных работ; расстояния между жесткими опорами (краевыми частями залежи, барьерными целиками, безрудными зонами); мощности рудной залежи; угла падения рудной залежи; удельного веса вмещающих пород, модулей упругости вмещающих пород и руд (если кровля рудного тела ослаблена пластичными сланцами различной прочности, в качестве параметра, характеризующего модуль упругости материала руды, принимается комбинированный модуль упругости), характеристик паспорта предельной прочности руды, предела прочности руды на одноосное сжатие; тектонической составляющей природного поля напряжений; толщины техногенного зазора [9];

- метод расчета допустимых пролетов кровли очистных камер в условиях запредельного деформирования междукамерных целиков, отличающихся от известных решений учетом коэффициентов структурного ослабления для различных подклассов и классов пород кровли с использованием подобия геомеханических условий нагружения для ситуаций с разделением этажа на подэтажи и без деления [25];

- метод расчета параметров барьерных целиков, отличающегося от известных решений совокупным учетом глубины горных работ; размеров смежных с целиком выработанных пространств; размера выработанного пространства вдоль длинной оси барьерного целика; мощности рудной залежи; угла падения рудной залежи; удельного веса вмещающих пород; характеристик паспорта предельной прочности руды, предела прочности руды на одноосное сжатие; величины тектонической составляющей и коэффициента запаса прочности барьерного целика, обеспечивающего его необходимую несущую способность с соблюдением ударобезопасности [11];

- методическое и программное обеспечение PRESS 3D URAL [13, 24] для прогнозирования геодинамического состояния рудной залежи и заблаговременного планирования противоударных мероприятий при проектировании и разработке удароопасных участков рудной залежи в блочном массиве горных пород, отличающегося от известных решений совокупным учетом глубины горных работ, пространственной конфигурации очистного забоя, целиков и выработок, естественной и техногенной податливости рудной залежи и целиков, параметров тектонических нарушений, условий и размеров зон проскальзывания по сместителям нарушений и возможностью программной автоматизации формирования исходной геолого-структурной и геомеханической модели.

Реализация IV этапа. Обоснованность правомерности применения вышеуказанных методик для определения допустимых параметров выработанных пространств и целиков различного назначения подтверждена значительным объемом работ по обследованию выработок и горных конструкций в наиболее удароопасных условиях на шахте «Кальинская»: в блоках 10е, 13^о, 9ю, 9-10ю, 10ю гор. –680 м, а также на шахте № 14-14^{ТМ}^о: в блоках 2-5" гор. – 620 м, 2-5 L гор. –570 м, 22-23с гор. –740 м, 1-2^о, 2сбис и 17-18е гор. – 680 м.

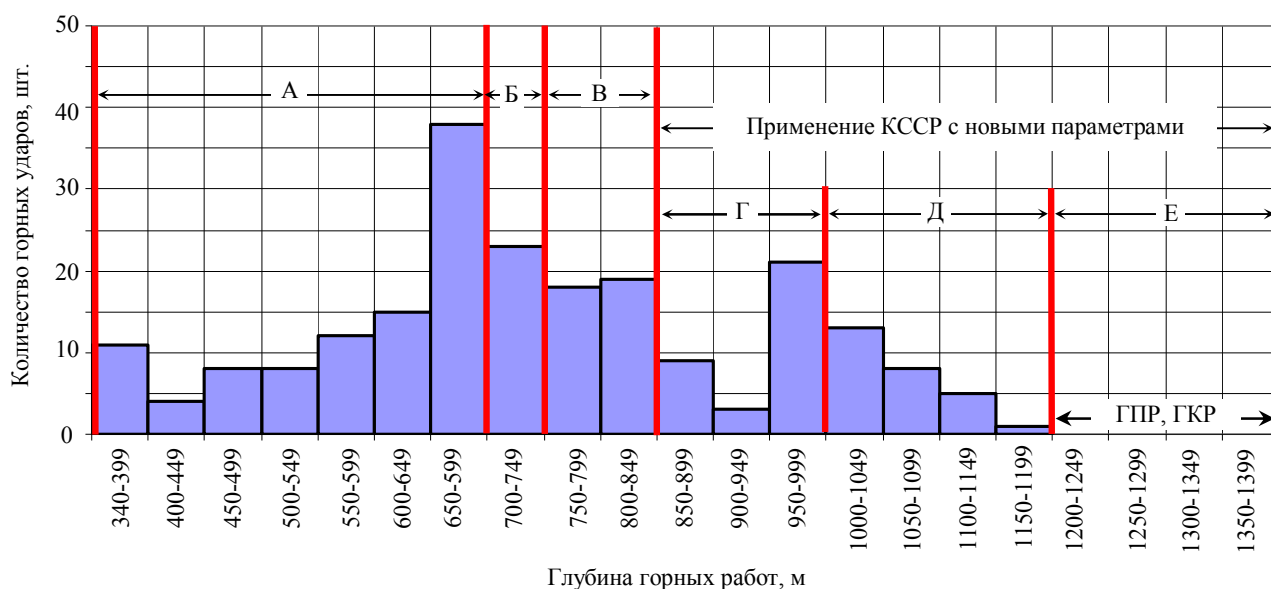


Рис.2. Интенсивность проявления горных ударов на шахтах СУБРА за весь период разработки (А-Е – этапы применения различных нормативно-методических документов по КССР)

Оценка эффективности внедрения рекомендаций при применении КССР

Разновидность условий	Количество горных ударов, расследованных при применении КССР, шт.							Эффективность рекомендаций, %
	До внедрения рекомендаций на этапе				После внедрения рекомендаций на этапе			
	А	Б	В	Σ_1	Г	Д	Σ_2	
<i>Горно-геологические условия</i>								
Простые ГГУ: УОР + НМЗ	4	0	2	6	1	2	3	+50,0
Сложные ГГУ: УНР + НМЗ	9	3	1	13	2	1	3	+76,9
Сложные ГГУ: УОР + УМЗ	6	1	0	7	0	3	3	+57,1
Сложные ГГУ: УНР + УМЗ	12	2	7	21	4	1	5	+76,2
Сложные ГГУ: УОР + НМЗ + МАТН	15	2	6	23	0	1	1	+95,7
Сложные ГГУ: УНР + НМЗ + МАТН	16	5	2	23	8	2	10	+56,5
Сложные ГГУ: УОР + УМЗ + МАТН	7	1	0	8	0	0	0	+100,0
Сложные ГГУ: УНР + УМЗ + МАТН	11	2	5	18	2	1	3	+83,3
Сложные ГГУ: УОР + НМЗ + КАТН	2	3	6	11	4	6	10	+9,1
Сложные ГГУ: УНР + НМЗ + КАТН	10	2	5	17	10	5	15	+11,8
Сложные ГГУ: УОР + УМЗ + КАТН	2	1	2	5	1	3	4	+20,0
Сложные ГГУ: УНР + УМЗ + КАТН	2	1	1	4	2	1	3	+25,0
<i>Горно-технологические условия</i>								
Бурение шпуров	11	4	4	19	5	0	5	+73,7
Взрывные работы	50	12	22	84	19	15	34	+59,9
Уборка руды	14	4	6	24	5	5	10	+58,3
Крепление выработок	4	0	0	4	1	1	2	+50,0
Скважинная разгрузка	0	0	3	3	0	0	0	+100,0
Выходные дни	17	3	2	22	3	5	8	+63,6
<i>Горно-технические условия</i>								
Панельные штреки	9	2	3	14	1	6	7	+50,0
Сбойки выработок	4	1	4	9	1	1	2	+77,8
Панельные целики	37	3	8	48	4	4	8	+83,3
Междукамерные целики	21	4	1	26	1	3	4	+84,6
Краевая часть залежи	5	5	13	23	10	5	15	+34,8
Участки у безрудных зон	7	3	2	12	4	1	5	+58,3
Участки у тектонических нарушений	13	5	6	24	12	7	19	+20,8

Примечание: знак «+» означает положительный эффект; УОР – участки залежи с однородными рудами; УНР – участки залежи с неоднородными рудами; НМЗ – нормальная мощность залежи; УМЗ – уменьшение мощности залежи; МАТН – мелко-амплитудные тектонические нарушения; КАТН – крупно-амплитудные тектонические нарушения.



Принятые параметры выработанных пространств и целиков позволили обеспечить безопасность ведения горных работ в сложных удароопасных условиях (невыверженная мощность рудной залежи, неравномерное оруденение: безрудные зоны и участки непромышленного оруденения, различие физико-механических свойств руд и вмещающих пород, тектоническая нарушенность, сложное взаимное влияние очистных работ, порядок ведения горных работ, применение систем разработки с оставлением целиков, большие площади обнажения кровли, повышенная изрезанность рудного массива). Корректность разработанного программного комплекса PRESS 3D URAL подтверждается подобием моделируемого геомеханического процесса – реальному, установленному при проведении опытно-экспериментальных работ на рудниках ОАО «Севералбокситруда» (шах. «Кальинская», гор. – 680 м, бл. 7ю-9ю).

Подтверждением эффективности применения КССР с новыми параметрами может служить график (рис.2), построенный по фактическим данным карточек горных ударов за весь период разработки месторождений СУБРа и отражающий изменение интенсивности проявления горных ударов на различных глубинах разработки, а также данные (см. таблицу) по проявлению горных ударов при различных горно-геологических, горно-технических и горно-технологических условиях.

Реализация V этапа. Разработанное методическое обеспечение определения безопасных параметров конструктивных элементов камерно-столбовой системы разработки вошло в следующую проектную и техническую документацию: 1) Руководство по выбору конструктивных параметров камерно-столбовой системы разработки на шахтах ОАО «Севералбокситруда», отрабатывающих месторождения с глубиной 1000 м и более; 2) Дополнение к Руководству по выбору конструктивных параметров камерно-столбовой системы разработки на шахтах ОАО «Севералбокситруда», отрабатывающих месторождения с глубиной 1000 м и более для глубин менее 1000 м; 3) Проект «Камерно-столбовая система разработки бокситовых месторождений на глубине 1000 м и более» на шахтах ОАО «Севералбокситруда»; Дополнение к Проекту «Камерно-столбовая система разработки бокситовых месторождений на глубине 1000 м и более на шахтах ОАО «Севералбокситруда» и доведено до промышленного внедрения на всех шахтах СУБРа распоряжением Ростехнадзора по Свердловской области.

Разработанный программный комплекс «PRESS 3D URAL» для текущей и прогнозной оценки напряженного и удароопасного состояния краевой части рудной залежи и целиков в сложных горно-геологических, горно-технических и геодинамических условиях используется для мониторинга безопасного ведения горных работ специалистами службы прогноза и предупреждения горных ударов.

Заключение. В результате выполненных исследований разработана методология по геомеханическому обеспечению КССР с учетом изменения характера влияния природных и техногенных факторов на состояние выработок и горных конструкций, поэтапная реализация которой позволяет существенно снизить удароопасность при применении КССР в удароопасных условиях на больших глубинах, а также доказана перспективность использования разработанного геомеханического обеспечения КССР в удароопасных условиях разработки месторождений Североуральского бокситового бассейна на больших глубинах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубков В.В.* О математическом моделировании напряженного состояния массива горных пород // Горная геомеханика и маркшейдерское дело: Сб. научн. тр. ВНИМИ. СПб, 1999. С.87-93.
2. *Зубков В.В.* О напряженном состоянии и устойчивости упругих блоков, взаимодействующих на границе // Проблемы теории трещин и механика разрушения (исследования по упругости и пластичности). Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. Вып.16. С.39-46.
3. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. РД 06-329-99 / ГП НТЦ по безопасности в промышленности ГТН России. М., 2003. 88 с.
4. Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Северо-Уральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Юкпорское, Кукисвумчорское (ПО «Апатит»), Качкарское и др. месторождения / ВНИМИ. Л., 1985. 182 с.
5. Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Северо-Уральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Юкпорское, Кукисвумчорское (ПО «Апатит»), Качкарское и др. месторождения / ВНИМИ. Л., 1989. 182 с.
6. *Микулин Е.И.* Прогноз и предотвращение горных ударов на Североуральских бокситовых месторождениях / Е.И.Микулин, В.Г.Селивоник, П.Ф.Матвеев. Североуральск: Изд-во «Север», 1995. 75 с.
7. *Петухов И.М.* Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / И.М.Петухов, А.М.Ильин, К.Н.Трубецкой. М.: Изд-во АГН, 1997. 376 с.
8. *Селивоник В.Г.* Опыт ведения горных работ в удароопасных условиях / В.Г.Селивоник, К.А.Войнов // Горный журнал. 2004. № 3. С.18-24.



9. Сидоров Д.В. Аналитический метод определения параметров запредельного деформирования руды для оценки удароопасности рудной залежи на больших глубинах при ведении очистных работ камерно-столбовой системой разработки // Записки Горного института. 2014. Т. 208. С. 277-282.
10. Сидоров Д.В. К расчету напряжений в несущих элементах камерно-столбовой системы разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 3. С. 42-43.
11. Сидоров Д.В. Научно-методическое обоснование параметров несущих барьерных целиков при камерно-столбовой системе разработки удароопасных рудных месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 12. С. 32-35.
12. Сидоров Д.В. Научно-методическое обоснование параметров податливых междукамерных целиков при камерно-столбовой системе разработки удароопасных рудных месторождений на больших глубинах // Там же. 2013. № 12. С. 28-31.
13. Сидоров Д.В. Применение автоматизированного программного комплекса «PRESS 3D URAL» для прогнозирования удароопасных зон и параметров заблаговременной скважинной разгрузки рудной залежи и целиков в сложных геомеханических условиях // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 284-293.
14. Шабаров А.Н. Пути снижения удароопасности при применении камерно-столбовой системы разработки на рудниках СУБРа / А.Н.Шабаров, А.А.Филинков, В.Г.Селивоник, Д.В.Сидоров // Геомеханика в горном деле – 2000: Доклады международной конференции 29 мая-2 июня / ИГД УрО РАН. Екатеринбург, 2000. С.242-249.
15. Brady B.H.G. An analysis of rock behavior in an experimental slopping block at the Mount Isa Mine, Queensland, Australia // Int J of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. 1977. N 14. P.59-66.
16. Brady B.H.G. Rock Mechanics For underground mining / B.H.G.Brady, E.T.Brown. Springer Science. 2005. 628 p.
17. Hedley D.G.F. Slope-and-pillar design for the Elliot Lake Uranium Mines // Bull. Cm. hst. Min. Metall. N 65. P.37-44.
18. Hoek E. Underground Excavations in Rock. The institution of Mining and Metallurgy / E.Hoek, E.T.Brown. London, 1980. 527 p.
19. Hoek E. The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update / E.Hoek, E.T.Brown // In Proc. 15' Canadian Rock Mechanics Symposium. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1988. P.31-38.
20. Kaiser P.K. Canadian Rockburst Support Handbook / P.K.Kaiser, D.R.McCreath, D.D.Tannant. Geomechanics Research Centre / MIRARCO. Canada, 1996. 324 p.
21. Maybee W.G. Pillar design in hard brittle rocks. School of Graduate Studies Laurentian University Sudbury, Ontario, Canada, 2000, http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape4/PQDD_0011/MQ61284.pdf.
22. Ortlepp W.D. Rock Fracture and Rockbursts: an Illustrative Study // SAIMM, Johannesburg, 1997. 98 p.
23. Shabarov A.N. Modern methods and means for solving forecast issues and prevention of geodynamic phenomena in collieries / A.N.Shabarov, N.V.Krotov, D.V.Sidorov, S.V.Tsirel // 21st World Mining Congress&Expo 2008, 7-12 September. Poland. Krakow. 2008. P.137-142.
24. Sidorov D.V. Automation of the interpolation of pre-processor basic data for program complex «PRESS 3D URAL» // Journal of advanced computer science and technology. 2013. N 2. P.59-67.
25. Sidorov D.V. Metodyka określenia parametrów odsłonięcia stropu w komorach wybierkowych przy eksploatacji złóż boksytu w warunkach głębokiego zalegania w północnej części Uralu // Mechanizacja i automatyzacja górnictwa. Katowice, Poland. 2014. N 2/516. P.51-57.
26. Tavakoli M. Underground metal mine crown pillar stability analysis. Doctor of Philosophy thesis, Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong, 1994. <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2280&context=theses>.

Автор Д.В.Сидоров, д-р техн. наук, доцент, sidorov-post@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 04.10.2016.