

УДК 622.83

Рассказов Игорь Юрьевич

доктор технических наук, профессор, директор,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

**ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРООПАСНОСТИ
НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ ДАЛЬНЕГО
ВОСТОКА И ЗАБАЙКАЛЬЯ****Аннотация:*

Рассмотрены особенности удароопасности на подземных рудниках Дальнего Востока и Забайкалья, где регистрируется весь спектр динамических проявлений горного давления и регистрируется техногенная сейсмичность. Установлено, что в массивах месторождений действуют неравнокомпонентные поля напряжений сжатия, наибольшие из которых ориентированы в направлении от северо-восточного до юго-восточного и в 1,5 – 3 раза превышают гравитационную составляющую от веса налегающей толщи пород. Превышение горизонтальных сжимающих напряжений над вертикальными определяется их геодинамической позицией в пределах тектонически активной Амурской плиты. Указаны основные подходы к решению проблемы прогноза и предотвращения горных ударов, которые предусматривают геодинамическое районирование с применением геологоструктурных методов и методов спутниковой геодезии, численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) и инструментальный контроль удароопасности горного массива на региональном и локальном уровнях. На примере месторождений жильного типа показана возможность оценки НДС массива горных пород на различных стадиях разработки рудных тел и обоснования эффективных профилактических мероприятий. Приведены основные принципы построения системы комплексного геомеханического мониторинга и результаты применения инструментальных методов и технических средств контроля удароопасности на дальневосточных рудниках. Система мониторинга объединяет многоканальные сейсмоакустическую и микросейсмическую измерительные комплексы, обеспечивающие регистрацию сейсмоакустических событий энергией от 10 до 10⁶ Дж в частотном диапазоне от 10 до 12000 Гц, а также деформационные станции, включая лазерный деформограф, способный регистрировать смещения земной коры с точностью до 0,1 нм в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц. В системе реализована технология временной синхронизации, дающая возможность поддерживать единое время во всех измерительных средствах с расхождением не более 10 мс, а все регистрируемые данные интегрируются в единую информационную сеть. Рассмотрена методика прогноза удароопасности по данным геомеханического мониторинга, основанная на установленных закономерностях проявления сейсмоакустической активности в массиве месторождений, склонных и опасных по горным ударам.

Ключевые слова: горные удары, техногенная сейсмичность, геодинамическая безопасность, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, мониторинг, прогноз

*В исследованиях также принимали участие сотрудники ИГД ДВО РАН Саксин Б.Г., Потапчук М.И., Аникин П.А., Гладырь А.В., Калинов Г.А., Мигунов Д.С., Рассказов М.И., Сидляр А.С., Терешкин А.А.

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.128

Rasskazov Igor Yu.

Doctor of Engineering, Professor,
Director, Mining Institute of the FEB RAS,
680000, Khabarovsk, Turgenev street, 51
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

**RESEARCH OF ROCK BUMP HAZARD
ON UNDERGROUND MINES
OF THE FAR EAST AND TRANSBAIKALIA****Abstract:*

Features of rock burst hazard on underground mines of the Far East and Transbaikalia are considered. All range of dynamic manifestations of rock pressure and technogenic seismicity is being registered there. It is established that non-equal component fields of tension of compression are present in rock massifs. The greatest ones are focused in the direction from northeast to southeast. These fields of tension exceed a gravitational component from the weight of the rock mass by 1.5-3 times. Excess of the horizontal compressive tension over the vertical ones is defined by their geodynamic position within tectonic active Amur plate. The main approaches are specified to the solution of this problem of the forecasting and preventing of rock bumps, which provide geodynamic division into districts with application of geological structural methods and methods of satellite geodesy, numerical modeling of the stress-strain state conditions (SSS) and control tools of burst hazard of the massif at the regional and local levels. On the example of vein type deposits the possibility of assessment of the SSS of the rock massif at various stages of ore bodies development and substantiation of effective preventive actions is shown. The basic principles of developing of complex geomechanical monitoring system are given and results of application of instrumental methods and technical means of control of burst hazard in the Far East mines. The system of monitoring unites multichannel seismic-and-acoustic and microseismic measuring complexes providing registration of seismic-and-acoustic events with energy from 10 to 10⁶ J in the frequency range from 10 to 12000 Hz. The system includes deformation stations, including the laser deformograph capable to register crust shifts with an accuracy of 0.1 nanometers in the frequency range from 0 to 1000 Hz. Temporary synchronization of the system giving the possibility to support united time in all measuring units with a divergence of no more than 10 μs is realized in the system. All registered data are integrated into uniform information network. The technique of the forecasting of bump hazard according to geomechanical monitoring based on the determined consistent patterns of manifestation of seismic-and-acoustic activity in the massif of the deposit inclined to rock bumps and bump hazard is considered.

Keywords: rock bumps, technogenic seismicity, geodynamic safety, the deflected mode, stress-state, numerical modeling, monitoring, forecasting

* Researchers of MI FEB RAS Saksin B.G., Potapchuk M.I., Anikin P.A., Gladyr A.V., Kalinov G.A., Migunov D.S., Storries M.I., Sidlyar A. S., Tereshkin A.A. have participated in researches.

Введение

Геомеханика является важной составной частью горной науки. В настоящее время большинство технологических процессов при добыче и переработке полезных ископаемых в той или иной степени базируется на данных, полученных в результате геомеханических исследований. Эти исследования необходимы для определения свойств и состояния горных пород и руд в процессе техногенного преобразования недр на различных масштабных уровнях [1]. При освоении месторождений твердых полезных ископаемых традиционно к числу наиболее актуальных геомеханических проблем относятся следующие: обеспечение устойчивости бортов и отвалов карьеров (при ведении открытых горных работ); при подземной разработке месторождений к вопросам сдвижения горных пород, охраны и поддержания горных выработок, устойчивости конструктивных элементов систем разработки добавляется проблема прогноза и предотвращения динамических проявлений горного давления и техногенной сейсмичности [2 – 5]. Рост глубин добычи полезных ископаемых, ухудшение горно-геологических условий разработки ставит перед геомеханикой на современном этапе целый ряд новых проблем, решение которых требует новых научных подходов и в отдельных случаях пересмотра традиционных взглядов на ранее устоявшиеся теоретические описания поведения горных пород в предельно напряженном состоянии [6]. Все это требует дальнейшего совершенствования методов и средств изучения геологической среды в условиях интенсивного техногенного воздействия, получения и переосмысления новых экспериментальных данных, полученных в районах с различным геодинамическим режимом. И здесь особый интерес представляют исследования по проблеме горных ударов, одной из наиболее сложных в геомеханике, выполненные в последние 50 лет на восточной окраине континента – в Дальневосточном регионе, где разрабатывается большое количество месторождений разнообразных полезных ископаемых.

Проблема геодинамической безопасности при ведении горных работ в сложных горно-геологических и удароопасных условиях

Постановка и проведение первых целенаправленных комплексных геомеханических исследований на Дальнем Востоке России были обусловлены необходимостью борьбы с участвовавшими случаями внезапных выбросов угля, породы и газа, а впоследствии и горными ударами в середине прошлого века на угольных шахтах Приморского края (в основном Партизанского бассейна) и Сахалина. Результаты этих исследований в значительной степени нашли отражение в работе [7] и других публикациях.

Следующий этап интенсивных геомеханических исследований берет начало в середине 70-х годов XX века в связи с появлением динамических проявлений горного давления при подземной разработке оловорудных и полиметаллических месторождений (Хрустальненский и Хинганский ГОКи, ПО «Дальполиметалл» и др.) [8]. В течение последующих 10 – 15 лет был выполнен большой объем работ по изучению физико-механических свойств горных пород и руд, оценке параметров полей напряжений в разрабатываемых массивах, влиянию горных работ на исходное напряженное состояние [8 – 10]. Установлено, что массивы удароопасных месторождений, как правило, сложены прочными, хрупкими и высокоупругими горными породами, склонными к разрушению в динамической форме. В массивах горных пород действуют неравнокомпонентные поля напряжений сжатия, наибольшие из которых ориентированы в направлении от северо-восточного до юго-восточного и в 1,5 – 3 раза превышают гравитационную составляющую от веса налегающей толщи пород [8]. Превышение горизонтальных (обусловленных действием тектонических сил) сжимающих напряжений над вертикальными (гравитационными) во многом определяется их геодинамической позицией в пределах тектонически активной Амурской плиты, характеризующейся высокой структурной неоднородностью, тектонической раздробленностью и наличием областей повышенных напряжений [11].

Высокая напряженность массива горных пород месторождений дальневосточного региона, которая в ряде случаев устанавливалась на относительно небольших глубинах, представляет одну из основных причин опасных динамических проявлений горного давления. Так, при разработке Южного полиметаллического месторождения, расположенного в Восточном Приморье, первые сильные горные удары были зарегистрированы на глубине 120 – 300 м от дневной поверхности [10].

У большой группы месторождений признаки удароопасности впервые наблюдались на глубинах 400 – 500 м, и с понижением горных работ интенсивность динамических проявлений нарастала.

Высокий уровень геодинамического риска сохраняется в последние годы на рудниках АО «ГМК «Дальполиметалл», где регистрируются многочисленные случаи техногенной сейсмичности. Они сопровождаются звуковыми проявлениями, щелчками и треском в массиве, падением заколов на различных участках рудничного поля. На рис. 1 показаны последствия горного удара на Николаевском руднике в штреке № 1 на гор. – 420 м, эпицентр которого находился под днищем блока 40 рудной зоны Восток-1 и сопровождался сильным звуковым эффектом, сотрясением массива по всему шахтному полю, запылением выработок. В результате горного удара из левого борта и кровли штрека было выброшено более 10 м³ породы, частично разрушены выработки на подэтажах гор. –375, –390, –406 м.

В целом анализ удароопасности на подземных рудниках дальневосточного региона указывает на усложнение горнотехнической ситуации и увеличение геодинамического риска при ведении горных работ, обусловленные ростом выработанных пространств и глубины разработки. Наблюдается активизация геодинамических процессов, протекающих в форме перестройки и самоорганизации блочного массива горных пород в природно-техногенном поле напряжений. Эти процессы сопровождаются смещениями и подвижками вдоль тектонических нарушений различного масштабного уровня, выделением значительной упругой энергии и проявлением техногенной сейсмичности.

В сложившихся условиях необходимы более углубленные комплексные геодинамические исследования, включающие оценку геодинамической, сейсмической обстановки и напряженно-деформированного состояния массивов горных пород; изучение закономерностей геодинамических полей и процессов в области техногенного влияния горных работ с использованием сейсмических, сейсмоакустических, геодезических, сейсмодформационных и иных методов с целью получения принципиально новой информации о напряженно-деформированном состоянии геологической среды, а также выделение региональных предвестников динамических явлений разного энергетического уровня в горных массивах.



Рис. 1 – Разрушения горных выработок в результате горного удара 06.04.2016 на Николаевском полиметаллическом месторождении

*Исследование особенностей формирования
природно-техногенных полей напряжений
в массивах удароопасных рудных месторождений*

Для решения проблемы удароопасности и снижения геодинамического риска при подземной разработке месторождения необходимо еще на начальной стадии его освоения оценить изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород под влиянием природных и техногенных факторов. При установлении закономерности перераспределения исходных напряжений в конструктивных элементах системы разработки появляется возможность управления горным давлением и обоснования комплекса мероприятий по снижению геодинамического риска.

В практике геомеханических исследований для изучения природно-техногенных полей напряжений наиболее широко применяется численное моделирование НДС методом конечных элементов [12 – 13]. Наиболее надежные результаты исследований обеспечивают 3D модели, учитывающие технологию отработки запасов, геологическое строение горного массива и особенности его тектонической структуры, включая особенности взаимодействия по границам тектонических блоков. При оценке степени потенциальной удароопасности отдельных участков массива используются известные критерии хрупкого и сдвигового разрушения, а также энергетический показатель удароопасности, учитывающий модуль спада руды на запредельной диаграмме деформирования [14].

За более чем 30-летний период исследований был решен многочисленный круг задач по исследованию особенностей формирования природно-техногенного поля напряжений в массивах месторождений, характеризующихся самыми различными горно-геологическими условиями и разрабатываемых с применением различных технологий. На различных стадиях отработки выявлялись наиболее напряженные участки рудничного поля и строились прогнозные карты напряженного состояния при развитии горных работ.

В настоящее время в дальневосточном регионе разрабатывают и готовят к освоению месторождения руд цветных и благородных металлов, часть из которых отнесена к категориям опасных или склонных к горным ударам. Особую группу в них составляют месторождения жильного типа с крутым падением рудных тел: Южное, Березовское, Забытое, Южно-Хинганское и ряд других. Для их отработки в качестве основных рекомендованы система разработки с магазинированием руды и система разработки подэтажными штреками.

Наибольшей удароопасностью характеризуется Южное месторождение, на котором с переходом горных работ на глубокие горизонты ежегодно регистрируется до 100 и более динамических проявлений горного давления с преобладанием толчков в глубине массива (сейсмических событий), доля которых превышает 40 % от общего числа динамических явлений [15]. Дополнительное влияние на усиление удароопасности оказали также факторы значительного увеличения объема непогашенного выработанного пространства и изменения горно-геологических условий разработки: параметров и элементов залегания рудных тел (мощности, угла падения, морфологии жил и др.), изменения механических характеристик литологического комплекса.

Для 3D моделирования НДС массива Южного месторождения использованы результаты лабораторных и натурных исследований: вмещающие породы характеризуются средней прочностью ($\sigma_{сж} \leq 118$ МПа) и высокими значениями модуля упругости ($E \leq 100$ ГПа); сульфидные руды близки по упругим свойствам к вмещающим породам ($E = 26,6-94,3$ ГПа), но менее прочны ($\sigma_{сж} = 50-55$ МПа); руды способны накапливать значительную потенциальную энергию и разрушаться в динамической форме.

По результатам моделирования установлено, что очистные работы на глубине более 400 м приводят к формированию зон повышенных напряжений в междукамерных целиках и краевых частях массива, преимущественно в двух верхних подэтажах; рост нормальных напряжений (среднего давления) происходит прямо пропорционально увеличению длины выработанного пространства L , достигая максимума (до 100 МПа и более) при полной отработке блока (рис. 2). Ситуация осложняется еще больше в случае полной отработки смежного очистного блока: в этом случае напряжения в целиках увеличиваются на 25 – 30 %. При этом возникает риск разрушения целиков верхнего подэтажа в динамической форме.

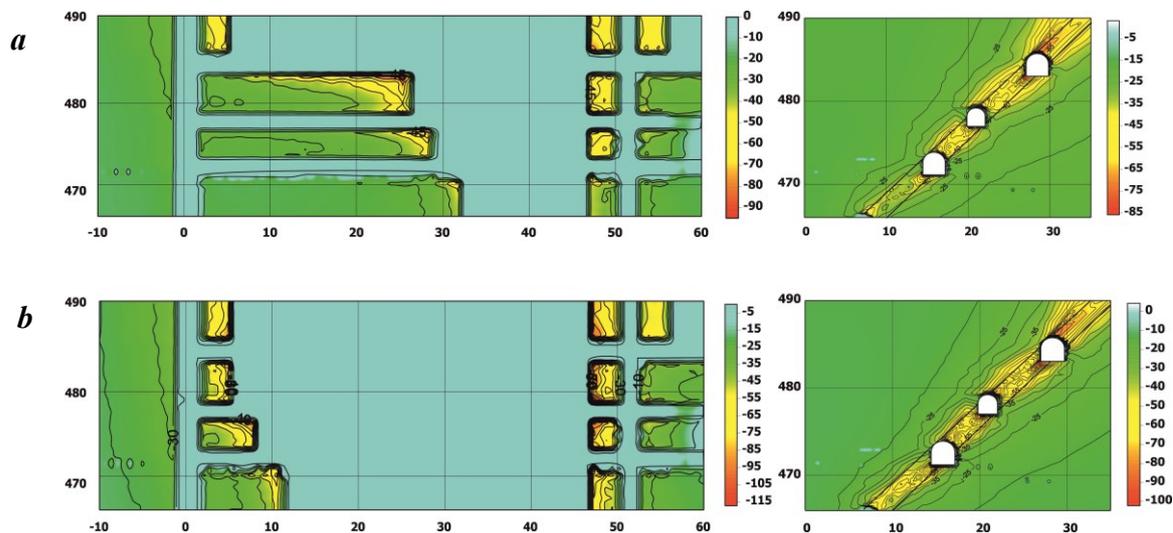


Рис. 2 – Распределение средних нормальных напряжений $\sigma_{\text{ср}}$ в конструктивных элементах системы разработки на месторождении Южное (в проекции на наклонную плоскость и на разрезе вкрест простирания рудного тела по линии междукамерного целика при $m = 3$ м; $\beta = 40^\circ$) при длине выработанного пространства: a – 20 м; b – 40 м

Схожие с Южным месторождением горно-геологические и геомеханические условия имеют вольфрамовое месторождение Забытое и Южно-Хинганское месторождение марганцевых руд, которые отнесены к категории склонных к горным ударам. Их отработку планируется вести системой с магазинированием руды, при которой способ управления горным давлением предполагает оставление надштрековых и подштрековых целиков, являющихся основными концентраторами напряжений. Наибольшие напряжения (среднее давление $\sigma_{\text{ср}}$, достигающее 100 МПа, и интенсивность касательных $\tau_{\text{инт}} - 70$ МПа) будут возникать в надштрековом целике на глубине от поверхности более 350 м при полной отработке вышележащих запасов и погашении целиков.

Высокая концентрация напряжений наблюдается в междукамерных целиках, а также в краевых частях рудного блока, еще на промежуточной стадии отработки очистного блока (при высоте магазина 20 м). Увеличение высоты магазина приводит к росту главных σ_1 и касательных напряжений в целиках на 20 – 25 %. Наиболее нагруженными являются междукамерные целики со стороны отработанного очистного блока. Особенно сложная потенциально удароопасная ситуация складывается при полной отработке блока (полном выпуске магазинированной руды из очистного блока), когда значения главных напряжений σ_1 приближаются к пределу прочности на сжатие, а касательных — к пределу прочности на сдвиг.

Результаты моделирования и исследований закономерностей формирования техногенных полей напряжений в разрабатываемых массивах горных пород рассматривае-

мых месторождений и общей практики отработки удароопасных месторождений показали: 1) изменение параметров конструктивных элементов систем разработки и порядка очистной выемки не всегда обеспечивает гарантированную защиту от опасных динамических проявлений горного давления; 2) необходимо снижение напряжений в рудных целиках путем реализации профилактических защитных мер, включая создание защитных зон путем бурения разгрузочных скважин, камуфлетное или сотрясательное взрывание и их сочетание.

Для условий Южного месторождения, обрабатываемого системой подэтажных штреков, были рассмотрены варианты различной ориентировки разгрузочных скважин относительно направления действия максимальных напряжений в условиях присущей ему изменчивости угла падения рудного тела. Установлено, что после отработки половины очистного блока (на длину 25 м) наиболее эффективным способом разгрузки междукammerных целиков является бурение скважин в кровле и почве выработки верхнего подэтажа перпендикулярно направлению действия максимальных напряжений, что обеспечивает снижение напряжений в целиках на 20 – 25 %.

На месторождениях Забытое и Южно-Хинганское для снижения степени удароопасности формирующихся междуэтажных над- и подштрековых целиков (высотой 5 м, шириной, равной мощности жилы 3 м, и длиной, равной длине обрабатываемого очистного блока – до 60 м) оценена эффективность создания защитной зоны камуфлетным взрыванием шпуровых зарядов на разгрузочные (компенсационные) скважины.

По результатам моделирования установлено: бурение скважин под углом 30 и 60° относительно рудного тела не обеспечивает достаточного снижения опасных концентраций напряжений, а под углом 45° приводит к разгрузке бортов выработки; увеличение длины скважины приводит к снижению напряжений в центре надштрекового целика на 15 %, но к значительному росту напряжений в его верхней части, где значения достигают 155 МПа (рис. 3).

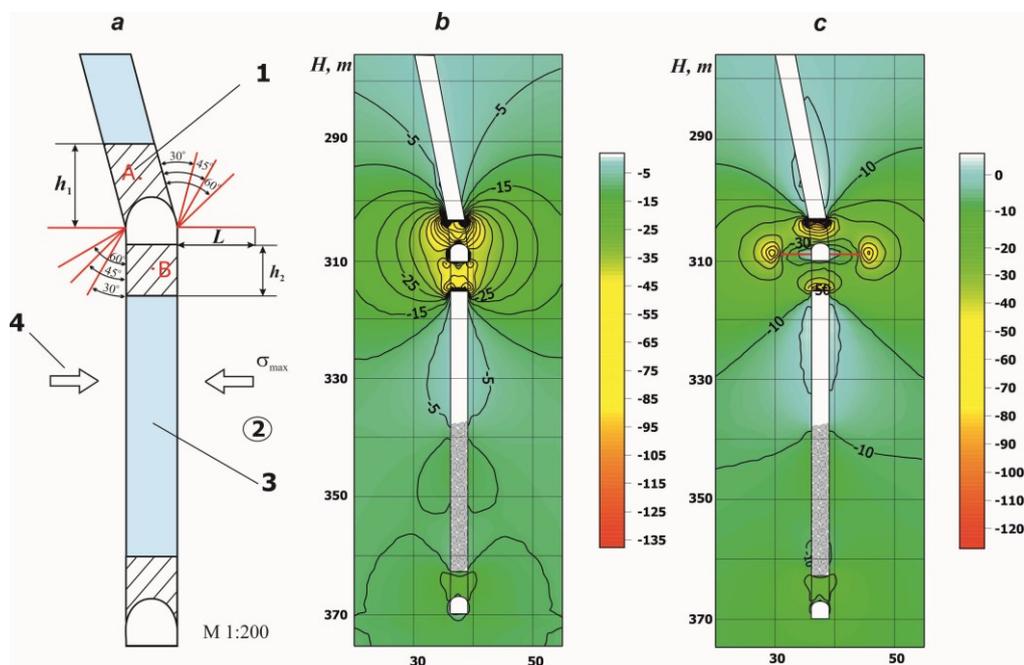


Рис. 3 – Расчетная схема *a* и распределение напряжений σ_{cp} в массиве горных пород:

b – до проведения профилактических мероприятий;

c – после бурения горизонтальных разгрузочных скважин длиной 10 м:

1 – рудный целик; 2 – вмещающие породы (граниты); 3 – выработанное пространство;

4 – направление действия напряжений σ_{max} ;

A, B – характерные точки в массиве горных пород для анализа НДС;

30, 45... – угол наклона разгрузочных скважин относительно рудного тела;

l_h – длина скважин (3–10 м); h_1, h_2 – высота надштрекового и подштрекового целика

Камуфлетное взрывание шпуровых зарядов на разгрузочные скважины, пробуренные по направлению действия максимальных напряжений длиной от 5 до 10 м на всю длину очистного блока, позволяет снизить степень удароопасности над- и подштрековых целиков, а также создает благоприятные условия по охране и поддержанию горной выработки.

Инструментальный контроль удароопасности и техногенной сейсмичности на рудниках Дальнего Востока и Забайкалья

При решении проблемы прогноза горных ударов и снижения геодинамического риска важную роль играют методы и технические средства оценки и контроля геомеханического состояния массива горных пород, применяемые непосредственно в подземных горных выработках [2, 5, 8, 16]. На месторождениях дальневосточного региона испытаны разнообразные измерительные комплексы, из которых наиболее широко применяются сейсмоакустические, микросейсмические и деформационные методы и средства, от локальных портативных регистраторов до многоканальных систем мониторинга, обеспечивающих региональный контроль всего рудничного поля или его участков [8, 17 – 20]. Они необходимы как для получения исходной информации о свойствах и состоянии массива горных пород, используемой для задач моделирования НДС, так и для верификации результатов теоретических исследований и последующего контроля геомеханических процессов при разработке месторождения.

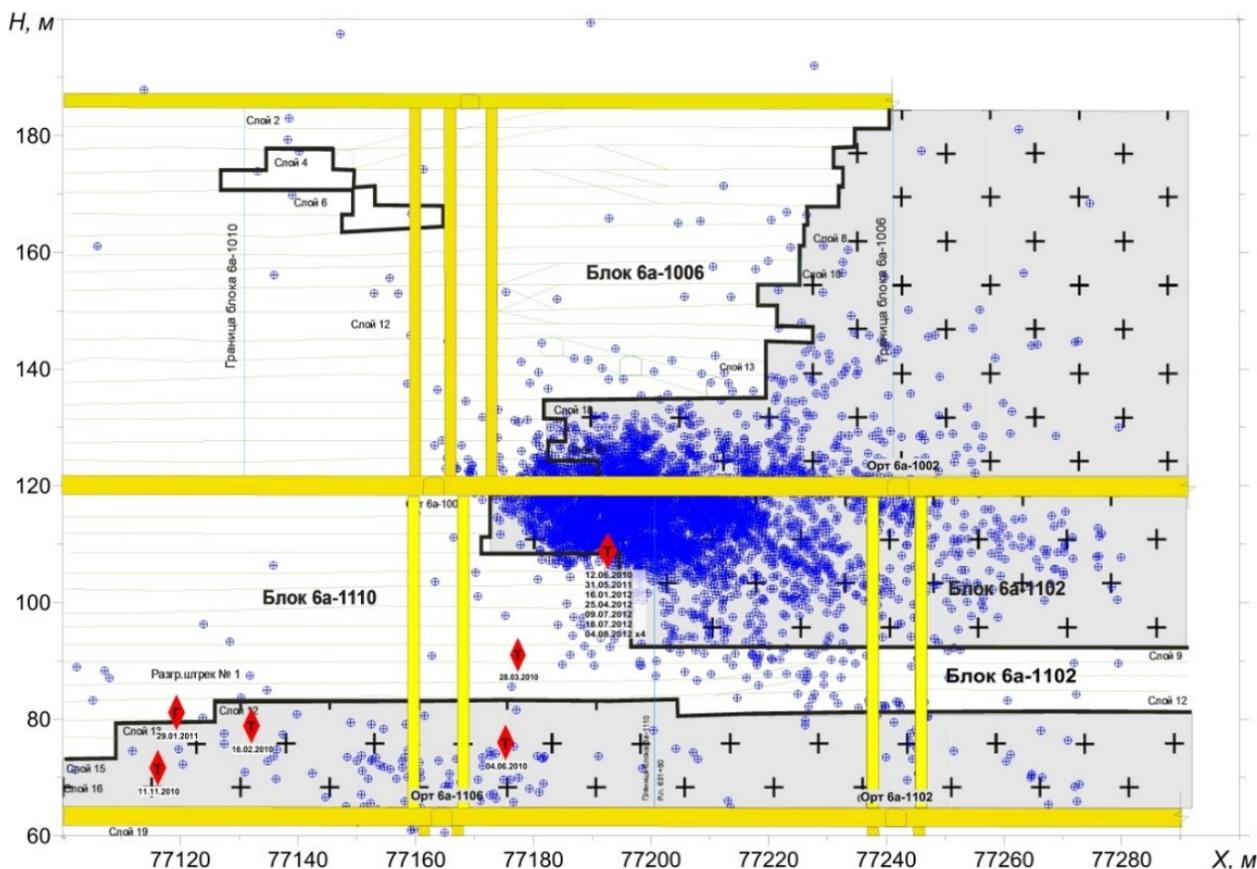


Рис. 4 – Пространственное распределение очагов сейсмоакустических событий по данным мониторинга на месторождении «Антей» (в проекции на вертикальную плоскость)

Наиболее надежные прогнозные оценки удароопасности могут быть получены при применении различных инструментальных методов, объединенных в единую систему комплексного геомеханического мониторинга, подобную созданной в районе месторождений урановых руд в Восточном Забайкалье [19]. Система мониторинга объединяет многоканальные сейсмоакустические и микросейсмические измерительные комплексы, обеспечивающие регистрацию сейсмоакустических событий энергией от 10 до 10^6 Дж в частотном диапазоне от 10 до 12000 Гц, а также деформационные станции, включая лазерный деформограф, способный регистрировать смещения земной коры с точностью до 0,1 нм в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц [20]. В системе реализована технология временной синхронизации, дающая возможность поддерживать единое время во всех измерительных средствах с расхождением не более 10 мс, а все регистрируемые данные интегрируются в единую информационную сеть, что дает возможность оперативной совместной интерпретации результатов наблюдений [21]. В качестве основной интеграционной платформы используется программный комплекс MineFrame [22], обеспечивающий представление и совместный анализ результатов геофизического мониторинга. При этом результаты геомеханического мониторинга фиксируются в базах данных, обрабатываются и представляются в форме карт сейсмоакустической и деформационной активности, графиков и диаграмм изменения энергетических, спектральных и других параметров геофизических полей.

По результатам комплексного геомеханического мониторинга на рудниках Дальнего Востока установлено, что важной особенностью поведения потенциально удароопасного массива является формирование в нем активных зон (потенциальных очагов геодинамических явлений), на что указывает процесс кластеризации источников микро-разрушений. На рис. 4 показано распределение сейсмоакустических событий в массиве-месторождения Антей, отражающих процесс формирования очагов горных ударов и техногенной сейсмичности.

Для выделения потенциальных очагов крупных динамических проявлений горного давления используется методика обработки экспериментальных данных [23], базирующаяся на методах кластерного анализа и теории случайных графов и экспериментально установленной закономерности, согласно которой расстояние r_i между всеми очагами микро-разрушений ($S_1 \dots S_P$) пуассоновского потока интенсивности λ в области U не превышает 10 м, а их большая часть (93 %) распределяется в двух первых интервалах по 2 м. Среднее минимальное расстояние между точками в пуассоновском потоке M_r определяется из выражения

$$M_r = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{4\pi\lambda R^3}{3}\right) dR = \frac{4\pi\lambda R^3}{3} = x^3 = \Gamma \frac{4}{3} \cdot dx \left(\frac{4\pi\lambda R^3}{3}\right)^{-1/3}. \quad (1)$$

Сформировав матрицу A из попарных средних расстояний между отобранными точками, можно сформулировать переход от случайного пуассоновского потока точек в сфере U к случайному графу:

$$\left\| \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \right\|_{i,j=1}^p. \quad (2)$$

Решение матрицы A_i дает возможность выделить максимальную («гигантскую») компоненту связности точек из области U . Выделенные очаги микро-разрушений из ряда $S_1 \dots S_i$ по признаку максимальной компоненты образуют собой очаговую зону из САЭ-событий и имеют связность (возможность объединения в кластер), чем отличаются от других событий в выборке (рис. 5).

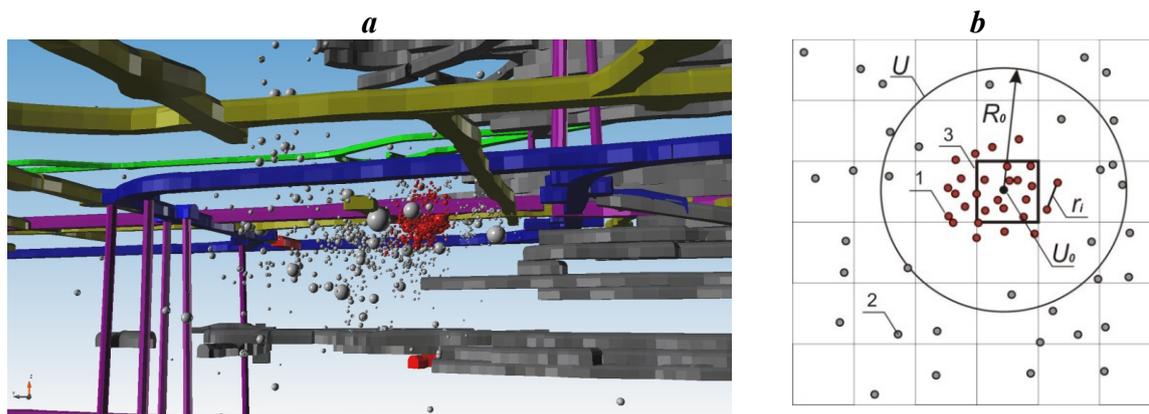


Рис. 5 – Выделение потенциально удароопасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустического мониторинга:

a – область формирующегося очага горного удара;

b – расчетная схема для выделения очаговых зон:

1 – красным выделены связанные между собой АЭ-события; 2 – несвязанные события (серый цвет);

3 – кластер с наибольшим количеством очагов АЭ-событий; U_0 – эпицентр САЭ-событий;

R_0 – радиус шара U ; r_i – расстояние между очагами АЭ-событий

По данным многолетних шахтных наблюдений установлено [8], что к основным признакам подготовки горного удара относятся рост числа САЭ-событий в 2 и более раз (N_{AE}); уменьшение среднеквадратичного расстояния (R_{MR}) от источника до центра формирующейся очаговой зоны; рост суммарной энергии (E_{AE}) более чем на 80 %; сокращение временного интервала между САЭ-событиями (t_{ST}) и снижение скорости миграции (v_{OZ}) эпицентра очаговой зоны до 8 м/сут.

На этой основе разработан комплексный показатель удароопасности (K_{BH}), который определяется как отношение нормированных (к данным за 5 предыдущих суток) значений суммарной энергии и числа АЭ-событий в активной зоне к произведению нормированных значений расстояния, времени между последующими событиями и скорости миграции центра зоны акустической активности:

$$K_{BH} = \frac{\bar{E}_{AE} \cdot \bar{N}_{AE}}{\bar{R}_{MR} \cdot \bar{t}_{ST} \cdot \bar{v}_{OZ}}, \quad (3)$$

где E_{AE} – суммарная энергия САЭ-событий в очаговой зоне (связанных между собой событий), Дж; N_{AE} – количество САЭ-событий в очаговой зоне; R_{MR} – расстояние между последующими САЭ-событиями, м; t_{ST} – время между последующими АЭ-событиями, с; v_{OZ} – скорость миграции центра очаговой зоны, м/сут.

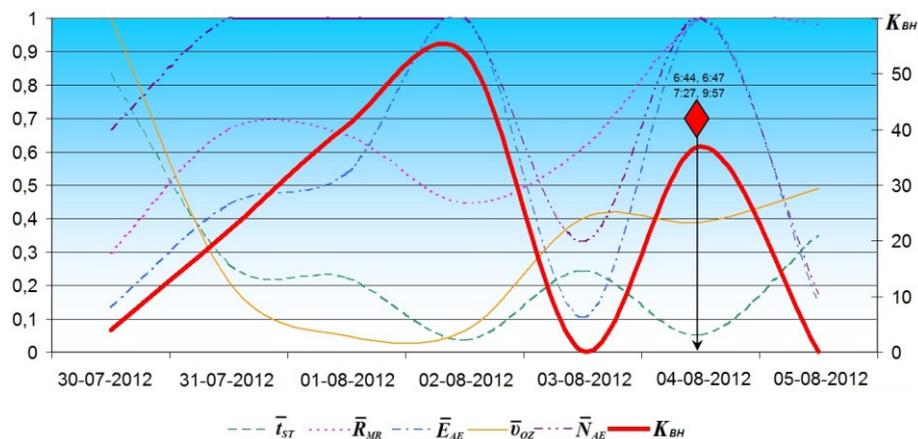


Рис. 6 – Изменение значений нормированных параметров сейсмоакустической активности, отражающее процесс подготовки горного удара 04-08-2012 на месторождении Антей

На рис. 6 показано изменение параметров сейсмоакустической активности и показателя K_{BH} перед серией из 4 сейсмических событий в районе блока ба-1102 месторождения Антей, сопровождавшихся разрушением закладочного массива и сотрясением зданий на поверхности рудника.

Количественные значения показателя, при котором устанавливается категория «Опасно», определялись методами дискретного анализа и математической статистики с применением интервальных алгоритмов распознавания образов. Так, для условий месторождения «Антей» критическая величина показателя удароопасности составила 5,11 ($K_{BH} > 5,11$). При этом надежность прогнозов динамических проявлений за последние 5 лет оказалась достаточно высокой и составила 84,4 %.

В процессе геомеханического мониторинга также выявлена взаимосвязь динамических проявлений горного давления и сейсмических волн от природных (землетрясения) и техногенных (технологические взрывы) источников. По данным высокоточного деформационного контроля на геодинамическом полигоне в районе Стрельцовского рудного поля установлено, что сейсмические волны от сильных землетрясений оказывают заметное влияние на деформационное поле, что отражается в повышении сейсмоакустической активности в 2 – 3 раза в сравнении со средним уровнем. Сейсмические волны выступают в роли триггера и инициируют разрушение в динамической форме участков массива горных пород, находящихся в предельно напряженном состоянии.

Для уточнения границ удароопасных зон, выявленных по данным регионального контроля, на дальневосточных рудниках применяются переносные приборы для экспресс-диагностики состояния краевых участков массива горных пород. Достаточную эффективность показал геоакустический прибор для локальной оценки удароопасности «Prognoz L» (рис. 7), с помощью которого верифицируются данные комплексного геомеханического мониторинга и определяются участки горных выработок и элементы горных конструкций, требующих применения способов их разгрузки и перевода в неудароопасное состояние.

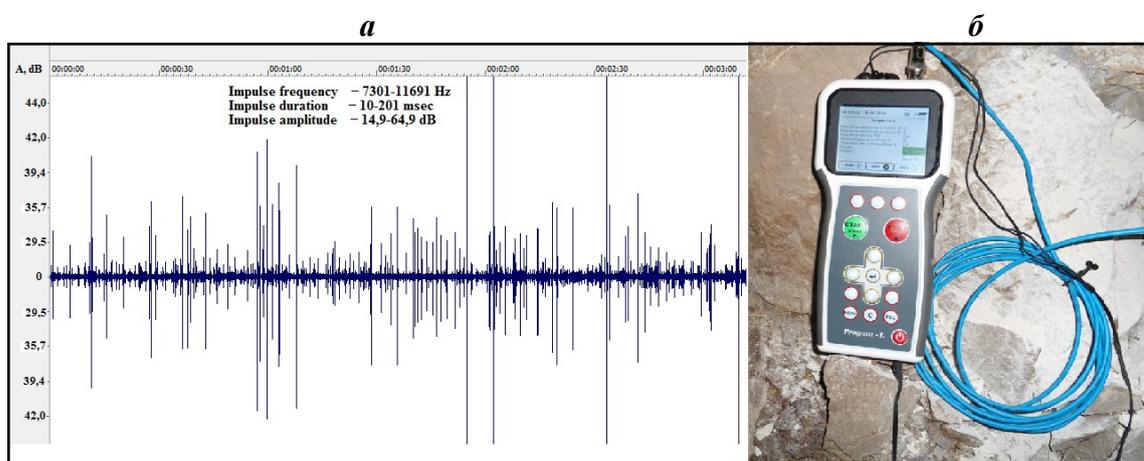


Рис. 7 – Сигналограмма (а), отражающая удароопасность массива горных пород, полученная по результатам экспресс-оценки прибором «Prognoz L» (б)

Заключение

В настоящее время геомеханическая ситуация на целом ряде подземных рудников Дальнего востока и Забайкалья определяется наличием широкого спектра динамических проявлений горного давления или отнесением участков массива к категории склонных к горным ударам. С ростом объемов выработанных пространств и глубины горных работ на месторождениях проявляется техногенная сейсмичность, часто сопровождающаяся

разрушениями горных выработок. В этих условиях требуются углубленные исследования удароопасности с применением комплекса современных методов и технических средств.

Методами численного моделирования НДС решается широкий круг геомеханических задач, включая выявление закономерностей формирования природно-техногенных полей напряжений в удароопасном массиве горных пород. Установлено, что наиболее удароопасными элементами систем разработки рудных тел являются различного типа целики, напряжения в которых на различных этапах отработки блоков могут в 2 – 3 раза превышать первоначальный уровень. Для снижения напряжений в рудных целиках целесообразно применение комплекса профилактических мероприятий, эффективные параметры которых принимаются по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

Для оценки состояния и свойств горных пород, верификации результатов численного моделирования и геомеханического контроля горного массива при эксплуатации месторождения на дальневосточных рудниках применяются сейсмоакустические, микросейсмические и деформационные методы и средства от локальных портативных регистраторов до многоканальных измерительных комплексов. Наибольший эффект дает их объединение в единую систему комплексного геомеханического мониторинга. Выявленные закономерности поведения удароопасного массива горных пород положены в основу разработанных методик оценки удароопасности, использование которых обеспечивает достаточно высокую надежность прогноза опасных геодинамических явлений.

Литература

1. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья / К.Н. Трубецкой, В.А. Чантурия, Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова. – М.: Наука, 2010. – 438 с.
2. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.
3. Geomechanics in mining: basic and applied research / Sashurin A.D. // Eurasian Mining. – 2012. – № 1. – P. 17-19.
4. Макаров А.Б. Практическая геомеханика / А.Б. Макаров. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.
5. Мельников Н.Н. Техногенная сейсмичность – опасный антропогенный фактор при ведении горных работ в высоконапряженных массивах / Н.Н. Мельников, А.А. Козырев, В.И. Панин // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2015. – № 5. – С. 425 - 433.
6. Адушкин В.В. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах / В.В. Адушкин, В.Н. Опарин // ФТПРПИ: Ч. I.; 2012. – № 2; Ч. II, 2013. – № 2; Ч. III, 2014. – № 4; Ч. IV, 2016. – № 1.
7. Бич Я.А. Профилактика горных ударов / Я.А. Бич, Н.А. Муратов. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1990. – 248 с.
8. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И.Ю. Рассказов. – М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 329 с.
9. О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения / В.Д. Барышников, М.В. Курленя, А.В. Леонтьев и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1982. – № 2. – С. 3 - 11.
10. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока / А.М. Фрейдин, В.А. Шалауров, А.А. Еременко и др. – Новосибирск: Наука, СИФ, 1992. – 177 с.
11. Present Day Stress Strain State in the Upper Crust of the Amurian Lithosphere Plate

/ I.Yu. Rasskazov, B.G. Saksin, V.A. Petrov, B.F. Shevchenko, V.I. Usikov, G.Z. Gil'manova // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50. – No. 3. – P. 444–452.

12. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

13. The birth of the finite element method and of computational mechanics / Zienkiewicz O.C. // *Int. J. Numer. Meth. Eng.* – 2004. – № 60. – P. 3-10.

14. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справочное пособие / И.М. Петухов и др. – М.: Недра, 1992. – 256 с.

15. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of Eastern Primorye / Potapchuk M.I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V. // *Eurasian mining*. – 2014. – № 1(21). – P. 18-22.

16. Методы и системы сейсмодинамического мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов / В.Н. Опарин, А.А. Маловичко, А.А. Козырев и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. - Т. 1, 2009; Т. 2, 2010.

17. Аксенов А.А. Применение метода акустической эмиссии для прогноза удароопасности массива горных пород / А.А. Аксенов, И.А. Ожиганов // *Горный журнал*. – 2014. – № 9. – С. 82 - 84.

18. New-generation portable geoaoustic instrument for rockburst hazard assessment / I.Yu. Rasskazov, D.S. Migunov, P.A. Anikin, A.V. Gladyr, A.A. Tereshkin, D.O. Zhelnin // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Vol. 51, № 3. – P. 614 - 623.

19. Развитие и модернизация системы контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО «ППГХО» / И.Ю. Рассказов, А.В. Гладырь, П.А. Аникин, В.С. Святецкий, Б.А. Просекин // *Горный журнал*. – 2013. – № 8 (2). – С. 9 - 14.

20. Применение лазерного деформографа в системе комплексного геодинимического мониторинга в районе Стрельцовского рудного поля / И.Ю. Рассказов, Г.И. Долгих, В.А. Петров, В.А. Луговой, С.Г. Долгих, Б.Г. Саксин, Д.И. Цой // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 6. – С. 29 - 37.

21. Гладырь А.В. Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля / А.В. Гладырь // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 6. – С. 220 - 234.

22. Лукичев С.В. Компьютерная технология инженерного обеспечения горных работ при освоении месторождений твердых полезных ископаемых / С.В. Лукичев, О.В. Наговицын // *Горный журнал*. – 2010. – № 9. – С. 11 - 15.

23. Algorithm of potentially burst-hazard zones dynamics representation in massif of rocks by results of seismic-acoustic monitoring / M.A. Guzev, I.Yu. Rasskazov, G.Sh. Tsitsiashvili // *Procedia Engineering*. – 2017 – № 191. – P. 36 – 42.