УДК 622.831.32

Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения

Д.В.СИДОРОВ¹, М.И.ПОТАПЧУК², А.В.СИДЛЯР², Г.А.КУРСАКИН²¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия² Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Представлены результаты выполненных исследований с использованием региональных и локальных методов прогноза и контроля геомеханического состояния рудного массива удароопасного Николаевского месторождения, расположенного в геодинамически активном районе. Объектом исследования является рудный массив Николаевского месторождения, характеризующийся интенсивной техногенной и тектонической нарушенностью и высокой геодинамической активностью. Целью исследований является практическая реализация методов и средств прогноза и контроля за геомеханическим состоянием удароопасного массива для своевременного прогноза опасных геодинамических явлений и повышения безопасности ведения горных работ. Опыт отработки удароопасных месторождений показывает, что для более точного прогноза опасных проявлений горного давления необходимо применение многоуровневых систем, в которых региональные методы и технические средства дополняются локальными. Для регионального прогноза удароопасности на Николаевском месторождении применяется сейсмоакустический метод с использованием автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS». Локальный прогноз выполняется с использованием прибора «Prognoz-L», геофизического метода (метод дискования керна) и визуальных наблюдений за динамическими проявлениями горного давления в горных выработках. Количественная оценка напряженно-деформированного и удароопасного состояния рудопородного массива выполняется с применением специализированного программного обеспечения «PRESS 3D URAL». Интеграция горно-технической и геомеханической информации в процессе выполненных исследований обеспечивает адекватную оценку удароопасности участков месторождения на разных стадиях его освоения. Опытнo-промышленная проверка применяемой системы, в которой региональные методы и технические средства дополняются локальными, показала удовлетворительные результаты на Николаевском руднике, что позволяет ее рекомендовать к использованию на других рудниках, ведущих добычу руды на больших глубинах в схожих условиях активизации геодинамических процессов.

Ключевые слова: тектоника; горный массив; напряженно-деформированное состояние; математическое моделирование; горно-техническая система; геодинамические процессы; горное давление; удароопасность

Как цитировать эту статью: Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения / Д.В.Сидоров, М.И.Потапчук, А.В.Сидляр, Г.А.Курсакин // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 392-398. DOI 10.31897/PMI.2019.4.392

Введение. В Дальневосточном регионе России, как и во многих других районах добычи полезных ископаемых, освоение месторождений происходит в усложняющихся горно-геологических и геомеханических условиях. При ведении подземных горных работ серьезную проблему представляют динамические проявления горного давления, наиболее опасными формами которых являются разрушительные горные и горно-тектонические удары, а также техногенные землетрясения, которые могут иметь катастрофические последствия [1, 4, 5, 15]. Поскольку территория Дальневосточного региона приурочена к зоне повышенной геодинамической активности, проявления горного давления на месторождениях особенно интенсивны: сопровождаются мощным сейсмическим эффектом, выбросом породы в горные выработки, структурной перестройкой блочного породного массива с подвижками по границам тектонических блоков. С переходом на глубокие горизонты и увеличением объемов выработанных пространств происходит активизация геодинамических процессов, что создает дополнительные предпосылки для формирования условий для горных ударов [2, 3, 7, 12, 14].

Нерешенность проблемы прогноза горных ударов и техногенных землетрясений до настоящего времени во многом обусловлена как сложным характером напряженно-деформированного состояния разрабатываемых массивов горных пород, так и трудностями учета многочисленных природных и техногенных факторов, которые участвуют в подготовке этих катастрофических явлений. В связи с этим для снижения риска геодинамических явлений требуется заблаговременное выделение потенциально удароопасных участков в рудничном поле и разработка эффективных рекомендаций по управлению горным давлением, направленных на повышение безопасно-

сти горных работ при освоении месторождений с применением комплекса региональных и локальных методов оценки и контроля геомеханического состояния массива горных пород.

Постановка проблемы. Среди разрабатываемых месторождений Дальневосточного региона, склонных и опасных по горным ударам, наиболее сложными условиями характеризуется Николаевское полиметаллическое месторождение, отработку которого ведет АО «ГМК «Дальполиметалл». Данное месторождение находится в пределах тектонически активной Амурской плиты, характеризующейся высокой структурной неоднородностью, тектонической раздробленностью и наличием областей повышенных напряжений [6, 8].

В последние годы отработка на Николаевском месторождении ведется преимущественно на южном и северном флангах рудной зоны «Восток-1» (блок Север-3; блок Север-8 и блок Северный фланг), а также в районе рудной зоны «Харьковская». С 2014-2015 гг. геомеханическая ситуация начала ухудшаться и это продолжается по настоящее время. Анализ пространственного распределения очагов геодинамических явлений, зарегистрированных в период с 5 по 8 октября 2015 г., и серии сильных толчков на глубоких горизонтах Николаевского месторождения показал, что вызваны они активизацией геодинамических процессов вдоль границ подработанного горными работами тектонического блока треугольной формы объемом более 5 млн м³ (рис.1).

В районе обрабатываемых блоков Север 8, Северный фланг и ранее в 2012 и 2008 гг. фиксировались мощные динамические проявления, сопровождающиеся сотрясением массива, пылеобразованием и сейсмическими колебаниями. Данные, полученные при замерах прибором локального прогноза и контроля удароопасности «Prognoz-L» в массиве с 5 по 7 октября 2015 г., были самыми информативными, так как были выполнены в выработках до и после проявлений геодинамических событий, когда происходили процессы постепенного нагружения и релаксации горного массива, сопровождавшиеся излучением импульсов акустической эмиссии различной интенсивности.

С середины 2015 г. на Николаевском руднике наблюдался заметный рост геодинамических событий, сопровождаемых сейсмическими эффектами и значительными разрушениями горных выработок. Рост интенсивности опасных динамических проявлений горного давления на Николаевском месторождении обусловлен нарушением горными работами естественного равновесия природно-техногенной системы, где определяющую роль играет центральный блок остенолита, по границам которого наблюдаются подвижки и смещения, сопровождающиеся техногенной сейсмичностью [8]. Так, только в IV кв. 2015 г. было зарегистрировано 25 динамических проявлений горного давления, в том числе и серия разрушительных толчков в период с 5 по 7 октября 2015 г., последние приурочены в основном к активным разломам, участкам массива, сложенного высокопрочными и хрупкими породами, нарушенными горными работами, границам тектонических блоков и элементам геологической структуры (дайковым телам, контактам литологических разностей и др.).

В 2016 г. геомеханическая обстановка продолжала ухудшаться и последствиями зарегистрированного 25 марта 2016 г. в районе рудной залежи Восток-1 сильного геодинамического явления стали разрушения крепи и контура горных выработок на горизонтах –375, –390, –406, –420 м, а также образование в массиве горных пород открытых разрывов и трещин (рис.2) протяженностью десятки метров. По границам разрывов наблюдались поднятия почвы на 10-12 см, а сами разрывы пространственно совпадают с элементами тектонической структуры месторождения. Объем разрушенной горной породы превысил 400 м³ [1].

С переходом горных работ на глубокие горизонты в условиях усложнения геомеханической ситуации на месторождении требуется комплексная оценка изменения напряженно-деформированного состояния массива на отдельных участках рудного поля, характеризующихся повышенной сейсмоакустической активностью.

Методология. Для оценки и контроля удароопасности на Николаевском месторождении применяется сейсмоакустический мониторинг с использованием автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS», действующей на руднике с апреля 2011 г. Для получения более точной информации о геомеханическом состоянии массива на отдельных участках рудничного поля данные регионального сейсмоакустического мониторинга комплексировются с результатами моделирования, а также данными, полученными в результате применения прибора локального контроля удароопасности «Prognoz-L», и визуальными наблюдениями за динамическими проявлениями горного давления в горных выработках. Портативный прибор ло-

Рис.1. Сейсмоакустическая активность массива Николаевского месторождения в районе зарегистрированного 05.10.2015 г. геодинамического явления

- 1 – выработки гор. –390 м; 2 – выработки гор. –360 м; 3 – тектонические нарушения: а – 1-го; б – 2-го порядков;
4 – дайки среднего и основного состава; 5 – выработанное пространство: а – гор. –360 м, б – гор. –390 м;
6 – динамические проявления на: а – гор. –360 м, б – гор. –390 м; 7 – техногенное землетрясение;
8 – изолинии суммарной энергии АЭ-событий; 9 – места измерения параметров АЭ прибором «Prognoz L»

кального контроля удароопасности «Prognoz-L» позволяет регистрировать импульсы упругих колебаний, излучаемых в процессе необратимого деформирования горных пород (процесс естественной акустической эмиссии) и выводить на жидкокристаллический индикатор результаты регистрации импульсов акустической эмиссии (АЭ) с автоматическим расчетом показателей и критериев удароопасности. По полученным критериям выявляется степень потенциальной удароопасности участка, где производился замер [9].

Для оценки состояния горного массива прибором локального контроля «Prognoz-L» используются методики, в которых в качестве критериев выступают интенсивность АЭ без видимого влияния технологических процессов $N_{АЭ}$ и показатель амплитудного распределения b . Показа-

Рис.2. Разрывные нарушения в массиве Николаевского месторождения, образованные в результате геодинамического явления 25.03.2016 г.

тель интенсивности $N_{\text{АЭ}}$ позволяет судить о достижении предельных нагрузок в горных породах краевой части массива. Показатель амплитудного распределения характеризует неустойчивость процесса деформирования, нарастание количества импульсов высокой энергии и рассчитывается по формуле [16]

$$b = \lg \frac{N_{\text{АЭ}}^1}{N_{\text{АЭ}}^2} / \lg \frac{A_2}{A_1},$$

где b – соотношение числа акустических импульсов с разной амплитудой (энергией); A_1 и A_2 – пороги (уровни чувствительности прибора); $N_{\text{АЭ}}^1$ и $N_{\text{АЭ}}^2$ – интенсивность АЭ при различных порогах.

Согласно требованиям [10], участки горного массива, на которых установлена категория «опасно», должны быть приведены в неудароопасное состояние с применением дополнительных мер предосторожности, обеспечивающих безопасность горнорабочих, занятых на этих работах. Приведение участков массива в неудароопасное состояние достигается в результате проведения профилактических мероприятий, направленных на снижение нагрузок на вмещающий массив (например, обрушение подработанных пород массива или уменьшение способности краевых частей рудопородных обнажений к накоплению потенциальной энергии упругого сжатия и хрупкому разрушению путем изменения их физико-механических свойств). Приведение в неудароопасное состояние участков массива с категорией «опасно» осуществляется созданием в краевой части рудопородных обнажений защитной зоны шириной не менее 2 м. Защитная зона создается путем взрывания камуфлетных зарядов взрывчатых веществ (ВВ), созданием разгрузочных щелей, бурением разгрузочных скважин или комбинацией этих способов.

Выбор параметров разгрузочных мероприятий основывается на количественной оценке напряженно-деформированного состояния высоконапряженных участков рудного массива. Согласно положениям [10], для оценки напряженного состояния разрешается использовать численные расчетные методы математического моделирования параметров напряженно-деформированного состояния массива на участках ведения горных работ. Для выявления особенностей распределения природно-техногенных полей напряжений были разработаны и реализованы объемные геодинамические модели напряженно-деформированного состояния горного массива с применением специализированного программного обеспечения «PRESS 3D URAL», базирующегося на реализации пространственного варианта метода граничных интегральных уравнений [7, 13]. Объемное геодинамическое моделирование месторождений заключается в последовательном наращивании информации по структуре, свойствам и геодинамическому состоянию массива горных пород. Информация о напряженно-деформированном состоянии блочного массива и структуре месторождения позволяет анализировать протекавшие, протекающие и ожидаемые в будущем геодинамические процессы на месторождениях, а дополнительная горно-геологическая, геофизическая и горно-техническая информация – конкретизировать положение и структуру геодинамически активных зон с учетом технологии горных работ.

Результаты исследований. С использованием автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS» был выполнен региональный прогноз сейсмоакустической активности массива Николаевского месторождения и построены потенциально опасные зоны с аномальными концентрациями, превышающими критериальные значения (см. рис.1).

Для уточнения данных регионального прогноза удароопасности в выработках, попадающих в границы потенциально опасных зон, был выполнен локальный инструментальный прогноз с применением геофизического прибора «Prognoz-L» для определения акустической эмиссии при контурного массива горных пород. На основании данных локального инструментального прогноза (см. таблицу) участок штрека транспортного № 8 на гор. –406 м был отнесен к категории удароопасных.

Результаты измерений параметров АЭ прибором «Prognoz L» в массиве горных пород Николаевского месторождения

Дата, время	Выработка	t, мин	Порог, дБ		Количество импульсов по каналам		Средняя активность N_{15}	Категория удароопасности
			1	2	N_1	N_2		
05.10.15 12:05	Штрек транспортный № 8 гор. –406 м	10	10	19	362	203	10,96	ОПАСНО

Для проведения компьютерного моделирования была использована первичная документация: геологические разрезы по линиям с II-II по XVIII-XVIII; горно-геологические разрезы по линиям с 30-30 по 50-50; разведочные планы горизонтов –120 м, –220 м, –320 м, –420 м; планы горных работ по горизонтам с –323 до –420 м. В соответствии с концепцией геодинамического районирования недр были разработаны блочная (геолого-структурная) и горно-геодинамическая модели участка шахтного поля Николаевского месторождения. На рис.3 показаны результаты создания блочной (геолого-структурной) модели рудной залежи, заключающиеся в обработке объектов элементов горных конструкций и выработок в пределах плана горных работ, включая плоскости сместителей тектонических нарушений № 1-10 (плоскости ТН программно разбиты на расчетные элементы), и формировании базы данных 3D-модели в программном обеспечении «PRESS 3D URAL» с визуализацией в графической системе AutoCad.

На рис.4 представлен горизонтальный разрез горно-геодинамической модели исследуемого участка с распределением нормальных сжимающих напряжений в условиях влияния тектонических нарушений месторождения. При оценке устойчивости массива горных пород применялся общепризнанный критерий хрупкого разрушения, определяемый как превышение максимальных сжимающих напряжений над пределом прочности пород на сжатие с учетом структурного ослабления (нарушенности) массива. Максимальный уровень напряжений (60 МПа и более) наблюдается в краевых частях массива вдоль выработанного пространства очистных камер, а также

Рис.3. Построение блочной (геолого-структурной) модели участка горного массива
1-13 – тектонические нарушения

в формируемых целиках между подготовительными выработками. Поскольку вмещающие породы моделируемого участка представлены известняками и туфами кварцитовых порфиров с пределами прочности на сжатие 99 и 99,6 МПа, а с учетом структурного ослабления 69 и 70 МПа соответственно, то уровень напряжений в массиве вдоль выработанного пространства очистных камер, а также в формируемых целиках между подготовительными выработками, приближается к предельным значениям, что говорит о повышенном уровне геодинамической опасности участков и необходимости проведения профилактических мероприятий.

Таким образом, численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в районе эпицентра наиболее крупного геодинамического события, зарегистрированного в период с 5 по 8 октября 2015 г., позволило количественно оценить уровень действующих напряжений в потенциально опасных зонах и принять необходимые меры для предотвращения опасных проявлений горного давления.

Одним из профилактических мероприятий, позволяющих снизить уровень опасности напряжения, является бурение опережающих разгрузочных скважин, основанное на использовании энергии горного давления. При этом эффективность мероприятия существенно зависит от схемы размещения и параметров разгрузочных скважин (направления относительно наибольших напряжений, глубины и диаметра) и будет разрабатываться для каждого выделенного потенциально удароопасного участка [10, 11].

Заключение. Полученные данные показали удовлетворительную корреляцию результатов сейсмоакустического прогноза удароопасности с применением региональной системы «Prognost-ADS» и локального прибора «Prognost-L» с данными численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива с применением программного обеспечения «PRESS 3D URAL». Таким образом, предложенная методология комплексного прогнозирования удароопасности участков шахтных полей сложного геологического строения на больших глубинах в условиях активизации геодинамических процессов позволяет повысить надежность определения параметров потенциально удароопасных зон еще на начальных стадиях их формирования и принять необходимые рациональные меры для предотвращения опасных проявлений горного давления.

Рис.4. Распределение нормальных напряжений (МПа) в рудопородных элементах при развитии очистных работ на гор. –390 м (с учетом влияния ТН)
1-13 – тектонические нарушения

ЛИТЕРАТУРА

1. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении / И.Ю.Рассказов, Б.Г.Саксин, В.И.Усиков, М.И.Потапчук // Горный журнал. 2016. № 12. С. 13-19.
2. Контроль геомеханического состояния геологической среды при отработке Шерегешевского месторождения / В.А.Еременко, А.А.Еременко, В.Н.Филиппов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 12. С. 155-169.

3. Отработка технологических блоков в зонах крупных тектонических нарушений на удароопасном железорудном месторождении / А.А.Еременко, В.А.Еременко, И.Ф.Матвеев и др. // Горный журнал. 2007. № 11. С. 34-36.
4. Рассказов И.Ю. Геомеханическая оценка условий разработки глубоких горизонтов полиметаллического месторождения «Южное» / И.Ю.Рассказов, Г.А.Курсакин, М.И.Потапчук // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 5. С. 125-134.
5. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. М.: Изд-во «Горная книга», 2008. 329 с.
6. Саксин Б.Г. Принципы комплексного изучения современного напряженно-деформированного состояния верхних уровней земной коры амурской литосферной плиты / Б.Г.Саксин, И.Ю.Рассказов, Б.Ф.Шевченко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 2. С. 53-65.
7. Сидоров Д.В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения / Д.В.Сидоров, М.И.Потапчук, А.В.Сидляр // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 604-611. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.604
8. Современное напряженно-деформированное состояние верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты / И.Ю.Рассказов, Б.Г.Саксин, В.А.Петров, Б.Ф.Шевченко и др. // Физика Земли. 2014. № 3. С. 144-153.
9. Терешкин А.А. Оценка удароопасности массива горных пород геоакустическим локальным методом / А.А.Терешкин, М.И.Рассказов, Д.И.Цой // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: Сб. докладов 3-й Международной научной конференции / ИПКОН РАН. М., 2018. С. 132-136.
10. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Николаевское и Южное (АО «ГМК «Даль-полиметалл»), опасных по горным ударам / И.Ю.Рассказов, Г.А.Курсакин, С.П.Осадчий, В.В.Попов и др. / ИГД ДВО РАН. Хабаровск, 2018. 72 с.
11. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам». № 576 от 02.12.2013. М., 2013. 41 с. URL: <https://normative.kotur.ru/document>
12. Assessment of stress-strain and shock bump hazard of rock mass in the zones of high-amplitude tectonic dislocations / N.I.Kosukhin, D.V.Sidorov, I.I.Beloglazov, V.Yu.Timofeev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 224. P. 1-5. DOI: 10.1088/1755-1315/224/1/012014
13. Sidorov D.V. The development of a software suite for predicting rock bursts within the framework of a system for ensuring geodynamic safety of mining operations / D.V.Sidorov, T.V.Ponomarenko // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June – 5 July, 2017. Vol. 17. Iss. 22. P. 633-638. DOI: 10.5593/sgem2017/22/S09.079
14. Solution of geoeological problems in underground mining of deep iron ore deposits / Yu.P.Galchenko, V.A.Eremenko, A.V.Myaskov, M.A.Kosyreva // Eurasian Mining. 2018. N 1. P. 35-40.
15. Study on the overlying strata movements and stability control of the retained goaf-side gateroad / Z.Zhang, H.Shimada, T.Sasaoka, W.Kai // Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University. 2016. Vol. 76. Iss. 2. P. 1-17.
16. Tereshkin A.A. Assessment of burst-hazard rock massif by geoacoustic method / A.A.Tereshkin, M.I.Rasskazov // Eurock 2018. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses (set of 2 volumes) proceedings of the 2018 European rock mechanics symposium / Saint-Petersburg Mining University. St. Petersburg, 2018. P. 1627-1632.

Авторы: **Д.В.Сидоров**, д-р техн. наук, профессор, sidorov@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **М.И.Потапчук**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, potapchuk-igd@mail.ru (Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия), **А.В.Сидляр**, младший научный сотрудник, alex-igd@mail.ru (Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия), **Г.А.Курсакин**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, rasskazov@igd.khv.ru (Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия).

Статья поступила в редакцию 21.02.2019.

Статья принята к публикации 11.03.2019.