Geomechanics

Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-112-117

# Применение цифровых геомеханических двойников для прогнозирования и оценки рисков потери запасов в проектах разработки рудных месторождений

Д.В. Сидоров<sup>1</sup>, Т.В. Пономаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Полигор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация <sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация ⊠ mail@polygor.com

**Резюме:** Проблемы разработки рудных месторождений, связанные с большими глубинами и возрастанием горно-геологических и горнотехнических рисков, существенно осложняют проектные решения и снижают эффективность горнорудного производства. В статье дается краткое описание методов исследований, проведенных специалистами компании Полигор и Санкт-Петербургского горного университета. Приведены результаты исследований тектонически напряженно-деформированное состояния и геодинамически опасных зон, или зон риска, при разработке рудных месторождений. Напряженно-деформированное состояние природного поля напряжений определялось с помощью специализированного программного обеспечения «PRESS 3D URAL». Исследования по обеспечению геодинамической безопасности производятся на основе объемной геодинамической модели и использования трех типов моделей: блочной (геолого-структурной), геодинамической и горно-геодинамической модели месторождения (шахтного поля или его участка). Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения аналитических методов расчета напряженного состояния блочного массива горных пород и, в частности, применения специализированного программного обеспечения «PRESS 3D URAL» в качестве цифрового геомеханического двойника и необходимости продолжения и расширения исследовательских работ в этом направлении повышения безопасности горнорудного производства.

*Ключевые слова:* риски, геодинамическая безопасность, тектонически напряженное состояние, цифровой двойник, геомеханический двойник, цифровая модель

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-510-44013\21

**Для цитирования:** Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В. Применение цифровых геомеханических двойников для прогнозирования и оценки рисков потери запасов в проектах разработки рудных месторождений. Горная промышленность. 2022;(3):112–117. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-112-117

# Application of digital geomechanical twins to predict and assess risks of reserve loss in ore mining projects

D.V. Sidorov<sup>1</sup>, T.V. Ponomarenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Polygor LLC, Saint Petersburg, Russian Federation <sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation imail@polygor.com

*Abstract:* Challenges in mining of ore deposits associated with great depths and increasing mining, geological and engineering risks make the design decisions significantly more complicated and reduce the efficiency of mining operations. The article provides a brief description of the research methods employed by specialists from the Polygore Company and Saint Petersburg Mining University. Results are presented of studying the tectonically stressed state and the geodynamically hazardous zones, or risk zones, in the mining of ore deposits. The stress-and-strain state of the natural stress field was determined using the PRESS 3D URAL dedicated software. Studies to ensure geodynamic safety were carried out based on a 3D geodynamic model and using three types of models, i.e. the block (geological and structural), geodynamic and mining-geodynamic model of the deposit (mine field or its segment). The results obtained allow making a conclusion about viability of applying analytical methods to calculate the stressed state of blocky rock mass and, in particular, application of the PRESS 3D URAL dedicated software as a digital geomechanical twin, as well as the need to continue and expand research activities in this direction to enhance safety of mining operations.

Geomechanics

Keywords: risks, geodynamic safety, tectonically stressed state, digital twin, geomechanical twin, digital model

*Acknowledgments:* The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Ministry of Education, Culture, Science and Sports of Mongolia under Research Project No. 19-510-44013\21

*For citation:* Sidorov D.V., Ponomarenko T.V. Application of digital geomechanical twins to predict and assess risks of reserve loss in ore mining projects. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):112–117. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-112-117

## Введение

Увеличение фактических расходов при разработке МПИ по сравнению с проектными решениями связано с труднопредсказуемым проявлением горного давления на современных глубинах разработки [1]. Для рудных месторождений глубины достигают 1800 м, при этом возрастают горно-геологические и горнотехнические риски, что усложняет проектирование технологических схем разработки и определяет необходимость обоснования технических решений, связанных с управлением горным давлением. Проявление таких рисков может приводить к потере части запасов руды в недрах, приостановке горных работ, возникновению горных ударов и снижению уровня производственной устойчивости. Это влияет на достижение ESG-целей компании в стратегической и операционной деятельности в соответствии с Целями устойчивого развития (ЦУР) ООН. Так, Русал нацелен на достижение ЦУР «Ответственное потребление и производство», выбрав направление, связанное с повышением эффективности производства и использованием новых технологий, что требует развития инженерно-технологической базы компании.

Сложная блочная структура недр ставит задачу более детального изучения напряженно-деформированного состояния рудо-породного массива на участках проектирования и разработки месторождения разного масштабного уровня. Одним из основных методов прогноза является метод геодинамического районирования недр, который позволяет не только уточнять геологическое строение блочного массива, но и выделять в нем наиболее опасные для горного производства тектонически напряженные зоны (TH3) и геодинамически опасные зоны (ГОЗ), или зоны риска [2]. Разработка рудных месторождений сопровождается развитием в массиве горных пород геодинамических процессов и явлений.

Средством выделения тектонически-напряженных зон являются аналитические методы расчета напряженного состояния блочного массива горных пород. Основная особенность задач о системах взаимодействующих блоков состоит в том, что число границ (контактов) существенно больше, чем в обычных задачах, решаемых численными методами. Поэтому целесообразно использовать программные комплексы, базирующиеся на методе граничных интегральных уравнений или методах вычислений, которые наилучшим образом приспособлены к учету большого количества границ [3].

Наличие тектонических разрывов, разделяющих горный массив на блоки пород, означает нарушение непрерывности поля напряжений в блочном массиве и разделение его на участки, состоящие из одного или нескольких блоков с более или менее однородным уровнем напряженности для данного ранга блоков [4–9].

При количественном описании тектонических нарушений месторождений рекомендуется пользоваться классификацией ВНИМИ, в основу которой по-ложен характер распределения напряжений у плоскости сместителя как наиболее универсальный и определяющий фактор. При этом классификация наряду с напряженным состоянием учитывает и геологическое строение массива в зоне влияния разрывных нарушений, по которому визуально определяется тип нарушения и вид напряженного состояния.

Тектонические нарушения, характеризующиеся зонами повышенной трещиноватости, в соответствии с классификацией ВНИМИ относятся ко 2-му типу и отличаются наличием зоны разгрузки непосредственно у дизъюнктива. Следом за зоной разгрузки в обоих крыльях рас-полагаются переходные зоны, уровень напряжений в пределах которых постепенно повышается. Далее следуют зоны повышенных концентраций напряжений. Геологическими признаками нарушений данного типа являются: в зоне разгрузки – развитая зона дробления; в переходных зонах возможно наличие повышенной трещиноватости; в зонах повышенных напряжений – породы более плотные и крепкие. Следует отметить, что решение пространственных геомеханических задач требует реализации достаточно сложного математического аппарата с применением производительной компьютерной техники.

## Метод исследования

Для проведения численных экспериментов по определению исходного напряженно-деформированного состояния (вертикальных, горизонтальных и касательных напряжений) блочного массива горных пород в пространственной постановке широко применяется программное обеспечение PRESS 3D URAL<sup>1</sup>. Основным результатом численных экспериментов являются величины широтной и меридиональной тектонических составляющих (рис. 1), действующих в ненарушенных граничных элементах массива горных пород (принимаются равными горизонтальным напряжениям).

На каждом иерархическом уровне метод решает определенные задачи, объединенные общим принципом - «от общего к частному». Исследования по обеспечению геодинамической безопасности производятся на основе объемной геодинамической модели. Объёмное геодинамическое моделирование месторождений заключается в последовательном наращивании информации по структуре, свойствам и геодинамическому состоянию массива горных пород [10–14]. Для достижения конечной цели необходима разработка трех типов моделей: блочной (геолого-структурной), геодинамической и, как конечный результат, горно-геодинамической модели месторождения (шахтного поля или его участка). Для проведения компьютерного моделирования требуется следующая документация: геологические разрезы по линиям, разведочные планы горизонтов, планы горных работ по горизонтам. Построенная сборная геолого-структурная блочная модель участка с добавлением плоскостей сместителей тектонических нарушений приведена на рис. 2.

<sup>1</sup> Программа для ЭВМ «PRESS 3D URAL». Свидетельство о государственной регистрации в Роспатент. – 2012. – Рег. № 2012618481.

# ГЕОМЕХАНИКА

Geomechanics



#### Рис. 1 Схема к выбору величин широтной и меридиональной тектонических составляющих

Fig. 1 Schematic drawing for selection the values of latitudinal and meridional tectonic components





-15 -20 -22 -24 -26 -28 -30 -32 -34 -36 -38 -40 -42 -44 -46 -48 -50 -52 -54 -56 -58 -60 -62 -64 -64

Рис. 4 Распределение нормальных напряжений по глубине

Fig. 4 Distribution of normal stresses versus depth



☐ Гор. -420 м 57900



гор. – 323 м



гор. – 348 м



гор. – 360 м

Fig. 5 Normal stress distribution patterns across the mine levels: Level –323 m, Level –348 m, Level –360 m

## Результаты

Результаты оценки дополнительных нормальных сжимающих напряжений, действующих в расчетных элементах горизонта, приведены на рис. 3. Распределение нормальных напряжений в массиве горных пород по глубине приведено на рис. 4. Результаты численной диагностики нормальных напряжений в рудо-породных элементах при развитии очистных работ на горизонтах отработки –323 м, –348 м, –360 м, –375 м, –380 м, –390 м, –406 м, –420 м приведены на рис. 5, 6, а закономерности распределения количества потенциально опасных зон (ПОЗ) на рис. 7.



#### Рис. 3 Распределение нормальных напряжений при развитии очистных работ

Fig. 3 Distribution of normal stresses with the progress of the excavation activities 77500

Рис. 5

Закономерности

гор. –348 м,

гор. -360 м

77000

57400

распределения нормальных

напряжений по горизонтам

отработки: гор. –323 м,

# **ГЕОМЕХАНИКА**

Geomechanics

122

120



Горизонт	Количество ПОЗ	Площадь ПОЗ, м²	Масса руды в ПОЗ, т
—323 м	94	2350	21 150
—348 м	101	2 525	22 725
–360 м	144	3 600	32 400
–375 м	123	3 075	27 675
–380 м	178	4 450	40 050
–390 м	300	7 500	67 500
—406 м	358	8 950	80 550
—420 м	122	3 050	27 450
Итого:	1 420	35 500	319 500

В настоящее время расчеты извлекаемой ценности могут быть основаны на рыночных ценах, регулируемых ценах или трансфертных ценах. Для экономической оценки ущерба от потери запасов в недрах использование рыночных цен более обоснованно, хотя фактически недополученная прибыль компании определяется на основе трансфертных цен. Потери общества от потери запасов руды в недрах включают недополученные суммарные доходы бюджета, включая налоги, потери ВВП, а также возможные мультипликативные эффекты в других отраслях. Проблемой является расчет цен для расчета потерь для общества, в качестве которых должны быть выбраны «теневые цены», т.е. фактически рыночные, очищенные от влияния государственного регулирования. Методология расчета таких цен в РФ до настоящего времени не разработана.

### Обсуждение результатов

напряжений по горизонтам

отработки: гор. -375м,

гор. -380 м, гор. -390,

гор. -406 м, гор. -420 м

Экономическая оценка внедрения цифрового геомеханического двойника в горное производство, обеспечивающего снижение горно-геологических и горнотехнических рисков, может быть выполнена по величине упущенной выгоды, под которой понимается недополученная компанией прибыль. В таблице представлены количество, площадь и масса руды в ПОЗ по горизонтам. Количество ПОЗ определено по результатам компьютерного моделирования НДС, затем при мощности рудной залежи 3 м, удельном весе руды 3 т/м<sup>3</sup>, определены площадь и масса руды в ПОЗ (рис. 7 и таблица).

levels: Level -375 m,

Level -406 m. Level -420 m

Level -380 m, Level -390 m,

При оценочной стоимости скважинной разгрузки 1 м<sup>2</sup> ПОЗ 5000 руб. (без геотехнического опробования) суммарные затраты на разгрузочное бурение всех ПОЗ составят 177500 тыс. руб.

При возникновении и расследовании аварии ущерб от производственного простоя при добыче руды может оцениваться по сумме фактических затрат на ликвидацию аварии, потерь минерального сырья в недрах и упущенной выгоды компании.

В случае полной потери запасов в недрах для расчетов используется извлекаемая ценность и себестоимость добычи руды с учетом объемов потерь. Например, для горизонта -323 м потери запасов руды в недрах могут составить 21,150 тыс. т.

## **ГЕОМЕХАНИКА** Geomechanics

Рис. 8 Цены на алюминий Источник: LME.Alum. Режим доступа: https://invest.yandex.ru/ catalog/quote/alum/

Цены Лондонской биржи металлов на алюминий в апреле–мае 2022 г. составляют \$2700 при средней цене за 10-летний период около \$2200 за тонну. Согласно прогнозу Goldman Sachs уже в 2022 г. средние цены на алюминий могут достичь \$3450 за тонну (рис. 8), в 2023 г. – \$3850, а в 2025 – \$5 тыс.

Цены на алюминий на внутреннем рынке являются регулируемыми и устанавливаются расчетным путем в соответствии с Предписанием ФАС. Отпускная цена на первичный алюминий на территории Российской Федерации не может превышать цену (Ц1), рассчитанную на базисе EXW или FCA (с завода) по формуле:

## $I_{1} = LME_{1} + \Pi_{A7},$

где LME<sub>1</sub> – среднее значение котировки определенной марки алюминия на Лондонской бирже металлов (LME/ЛME) за соответствующий период:

$$\Pi_{a7} = \Pi_{nper} - \Pi_{\varphi} - \Pi_{n},$$

где П<sub>прег</sub> – среднее значение показателя региональной премии для алюминия определенной марки на основном для соответствующего товара сегменте мирового рынка, на который компанией «Русал» экспортируется наибольший объем товара по сравнению с другими сегментами мирового рынка; Л<sub>ф</sub> – средневзвешенная величина фактических логистических расходов компании «Русал» на

фрахт от порта на территории РФ; Л<sub>п</sub> – средневзвешенная величина фактических логистических расходов компании «Русал» на доставку алюминия от заводов-производителей до основного порта РФ с учетом портовых расходов по перевалке грузов на судно за 3-й месяц, предшествующий месяцу отгрузки.

Поскольку цены внутреннего рынка также построены на биржевых ценах LME, последние применяются при оценке упущенной выгоды. При оценке будущих потерь должны применяться прогнозные цены, которые имеют тенденцию к росту.

Выполнены оценки для двух горизонтов, с минимальным и максимальным числом ПОЗ. Для бокситового сырья рыночные цены, по различным оценкам, составляют 80–200 долл/т, в расчетах приняты 10 000 руб/т, себестоимость добычи руды принята 3000 руб/т.

Тогда упущенная выгода для компании по чистой прибыли от потери запасов на горизонте -323 м составит:  $(10000 - 3000) \cdot 21,150 \cdot (1 - 0,2) = 118440$  тыс. руб.

Затраты на бурение ПОЗ на горизонте –323 м составляют 2350 · 5000 = 11750 тыс. руб.

## Заключение

Таким образом, при годовой производственной мощности 2 млн тонн будет либо не выполнен план на 15%, либо необходимо постоянно иметь резерв 15–20%, что превышает 10% от требуемых проектных капитальных затрат.

При этом затраты на бурение ПОЗ, определенные с применением цифрового геомеханического двойника, на примере горизонта –323 м составляют около 10% от величины чистой прибыли, рассчитанной по извлекаемой ценности рудной массы. При этом горизонт –323 м имеет минимальное число ПОЗ. При выполнении аналогичных расчетов для горизонта –406 м и числа ПОЗ 358 ед. затраты на бурение ПОЗ, определенные с применением цифрового геомеханического двойника, также составляют около 10% от величины чистой прибыли, рассчитанной по извлекаемой ценности рудной массы. Однако по абсолютной величине потери чистой прибыли существенно возрастают и составляют: (10000 – 3000) · 80,550 · (1 – 0,2) = 451080 тыс. руб.

Затраты на бурение ПОЗ на горизонте –323 м составляют 8950 · 5000 = 44750 тыс. руб.

## Список литературы

1. Que C.T., Nevskaya M., Marinina O. Coal mines in vietnam: geological conditions and their influence on production sustainability indicators. *Sustainability*. 2021;13(21):11800. https://doi.org/10.3390/su132111800

2. Batugin A.S. Reactivation of major faults during strong rock bursts as realization of tectonic process. In: Da Fontoura Setgio A.B., Rocca Ricardo Jose, Mendoza Jose Felix Pavon (eds). *Paper presented at the rock mechanics for natural resources and infrastructure development. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International congress on rock mechanics and rock engineering (ISRM 2019), Foz Do Igvassu, Brazil, 13–18 September 2019.* Taylor & Francis; 2020, pp. 1261–1268.

3. Козырев А.А., Земцовский А.В., Кулькова М.С., Соннов М.А. Опыт применения САЕ Fidesys при разработке численных геомеханических моделей Ждановского месторождения. *Горная промышленность*. 2021;(6):94–98. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-94-98

4. Aydan Ö. Continuum and computational mechanics for geomechanical engineers. CRC Press; 2021. 344 p.

5. William G. Pariseau notes on numerical modeling in geomechanics. CRC Press; 2022. 292 p.

6. Oka F., Kimoto S. Computational Multiphase Geomechanics. CRC Press; 2021. 354 p.

7. Fern J., Rohe A., Soga K., Alonso E. The material point method for geotechnical engineering. CRC Press; 2020. 442 p.

8. Fernandes M.M. Analysis and design of geotechnical structures. CRC Press; 2020. 754 p.

9. Bull J.W. Numerical analysis and modelling in geomechanics. CRC Press; 2019. 392 p.

Geomechanics

10. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Усиков В.И., Потапчук М.И. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении. *Горный журнал.* 2016;(12):13–19. https:// doi.org/10.17580/gzh.2016.12.03

11. Еременко А.А., Машуков И.В., Еременко В.А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017;(1):70–76.

12. Серебряков Е.В., Гладков А.С. Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная». Записки Горного института. 2021;(250):512–525. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4

13. Зуев Б.Ю. Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов. *Записки Горного института*. 2021;(250):542–552. https://doi.org/10.31897/ PMI.2021.4.7

14. Кашников Ю.А., Ермашов А.О., Ефимов А.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения. Записки Горного института. 2019;(237):259–263. https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.259

## References

1. Que C.T., Nevskaya M., Marinina O. Coal mines in vietnam: geological conditions and their influence on production sustainability indicators. *Sustainability*. 2021;13(21):11800. https://doi.org/10.3390/su132111800

2. Batugin A.S. Reactivation of major faults during strong rock bursts as realization of tectonic process. In: Da Fontoura Setgio A.B., Rocca Ricardo Jose, Mendoza Jose Felix Pavon (eds). *Paper presented at the rock mechanics for natural resources and infrastructure development. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International congress on rock mechanics and rock engineering (ISRM 2019), Foz Do Igvassu, Brazil, 13–18 September 2019.* Taylor & Francis; 2020, pp. 1261–1268.

3. Kozyrev A.A., Zemtsovskiy A.V., Kulkova M.S., Sonnov M.A. Experience of CAE Fidesys application in numerical geomechanical modelling of Zhdanovskoe deposit. *Russian Mining Industry*. 2021;(6):94–98. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-94-98

4. Aydan Ö. Continuum and computational mechanics for geomechanical engineers. CRC Press; 2021. 344 p.

5. William G. Pariseau notes on numerical modeling in geomechanics. CRC Press; 2022. 292 p.

6. Oka F., Kimoto S. Computational Multiphase Geomechanics. CRC Press; 2021. 354 p.

7. Fern J., Rohe A., Soga K., Alonso E. The material point method for geotechnical engineering. CRC Press; 2020. 442 p.

8. Fernandes M.M. Analysis and design of geotechnical structures. CRC Press; 2020. 754 p.

9. Bull J.W. Numerical analysis and modelling in geomechanics. CRC Press; 2019. 392 p.

10. Rasskazov I.Yu, Saksin B.G., Usikov V.I., Potapchuk M.I. Rock mass geodynamics and mining-induced rockbursting at Nikolaev complex deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(12):13–19. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.03

11. Eremenko A.A., Mashukov I.V., Eremenko V.A. Geodynamic and seismic events under rockburst-hazardous block caving in Gornaya Shoria. *Journal of Mining Science*. 2017;53(1):65–70. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S1062739117011859

12. Serebryakov E.V., & Gladkov A.S. Geological and structural characteristics of deep-level rock mass of the Udachnaya pipe deposit. *Journal of Mining Institute*. 2021;(250):512–525. (In Russ.) https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4

13. Zuev B.Y. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021;(250):542–552. (In Russ.) https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.7

14. Kashnikov Y.A., Ermashov A.O., Efimov A.A. Geological and geomechanical model of the verkhnekamsk potash deposit site. *Journal of Mining Institute*. 2019;(237):259–263. (In Russ.) https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.259

## Информация об авторах

Сидоров Дмитрий Владимирович – доктор технических наук, действительный член АГН России, заместитель генерального директора по научной работе, ООО «Полигор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: mail@ polygor.com

Пономаренко Татьяна Владимировна – доктор экономических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой организации и управления, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

## Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.05.2022 Поступила после рецензирования: 18.06.2022 Принята к публикации: 20.06.2022

## Information about the authors

**Dmitry V. Sidorov** – Dr. Sci. (Eng.), Full-fledged member of the Russian Academy of Mining Sciences, Deputy Director General for Research, Polygor LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: mail@polygor.com

**Tatyana V. Ponomarenko** – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy Head of the Organization and Management Department, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

## Article info

Received: 29.05.2022 Revised: 18.06.2022 Accepted: 20.06.2022