

# Комплексное геомеханическое моделирование разработки жильных месторождений блочного строения

Н.Е. Мороз<sup>1</sup>✉, Д.В. Сидоров<sup>2</sup>, М.А. Соннов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Полигор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

✉ moroz.nikita.1998@mail.ru

**Резюме:** Разработка жильных месторождений, сформированных в блочных структурах, требует учета влияния деформационных процессов, происходящих в результате изменения природно-техногенного состояния массива горных пород. Информация о величинах и направлениях напряжений, действующих в блочном массиве, является граничными условиями, учитываемыми в дальнейших расчетах напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструктивных элементов подземной геотехнологии. Для эффективной оценки естественного напряженного состояния тектонически нарушенного массива, сопряженной с необходимостью численного моделирования геомеханического состояния тектонических структур, распространенных на значительных площадях, принято специализированное ПО «PRESS 3D URAL» (ООО «Полигор», г. Санкт-Петербург) в пространственной постановке. При этом благодаря элементам залегания и морфологии рудных жил для локальной оценки концентраций напряжений в окрестности горных выработок и целиков, формирующихся в результате ведения горных работ, целесообразно применение ПО «CAE Fidesys» (ООО «Фидесис», г. Москва) в плоской постановке.

**Ключевые слова:** жильное месторождение, тектоническое строение, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, геодинамическое районирование, прогноз удароопасности

**Для цитирования:** Мороз Н.Е., Сидоров Д.В., Соннов М.А. Комплексное геомеханическое моделирование разработки жильных месторождений блочного строения. *Горная промышленность*. 2023;(6):71–74. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-71-74>

## Complex geomechanical modeling of mining vein deposits of block structure

N.E. Moroz<sup>1</sup>✉, D.V. Sidorov<sup>2</sup>, M.A. Sonnov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

<sup>2</sup> Polygor LLC, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> Fidesis LLC, Moscow, Russian Federation

✉ moroz.nikita.1998@mail.ru

**Abstract:** Mining of vein deposits formed in block structures requires consideration of the impact from the deformation processes occurring as a result of changes in the natural and man-induced state of the rock mass. Information on the magnitude and directions of stresses acting in the block mass are the boundary conditions taken into account in further calculations of the stress-and-strain state and stability of structural elements of underground geotechnology. For an efficient assessment of the natural stressed state of a tectonically disturbed rock mass, associated with the need for numerical simulation of the geomechanical state of tectonic structures, spread over large areas, the PRESS 3D URAL dedicated software suite (Polygor LLC, St. Petersburg) was adopted for 3D settings. At the same time, due to the occurrence elements and morphology of the ore veins it is advisable to use the CAE Fidesys software suite (Fidesys LLC, Moscow) in 2D settings for local assessment of the stress concentrations in vicinity of mine workings and pillars formed as the result of mining operations.

**Keywords:** vein deposit, tectonic structure, stress-and-strain state, numerical modeling, geodynamic zoning, prediction of rock-bump hazard

**For citation:** Moroz N.E., Sidorov D.V., Sonnov M.A. Complex geomechanical modeling of mining vein deposits of block structure. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):71–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-71-74>

**Введение**

Разработка жильных месторождений, сформированных в блочных структурах, требует учета влияния деформационных процессов, происходящих в результате изменения природно-техногенного состояния массива горных пород. Это связано с тем, что исходное напряженное состояние блочного массива горных пород, обусловленное действием двух независимых гравитационного и тектонического силовых полей, оказывает дополнительное влияние к техногенным нагрузкам от ведения горных работ. При этом информация о величинах и направлениях напряжений, действующих в блочном массиве, является граничными условиями, учитываемыми в дальнейших расчетах напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструктивных элементов подземной геотехнологии [1–8]. Особую актуальность учет природно-техногенного напряженного состояния приобрел при оценке склонности месторождений к горным ударам, требуемой ФНИП России («Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности, утв. приказом №505 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 08.12.2020 г. URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/mining/acts/general/> (дата обращения: 8 декабря 2020 г.).

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 более или менее однородным уровнем напряженности для данного ранга блоков. Для эффективной оценки естественного напряженного состояния тектонически нарушенного массива, сопряженной с необходимостью численного моделирования геомеханического состояния тектонических структур, распространенных на значительных площадях, целесообразно использовать специализированное ПО «PRESS 3D URAL» (ООО «Полигор», г. Санкт-Петербург), базирующееся на реализации метода граничных интегральных уравнений (МГИУ) в пространственной постановке и предназначенное для количественного определения величины тектонической составляющей природного поля напряжений с ее дифференциацией в границах районирования при проведении геодинамического районирования и обосновании проектных решений в части выбора параметров конструктивных элементов разработки месторождений полезных ископаемых [9; 10]. Это связано с тем, что основная особенность задач о системах взаимодействующих блоков связана с необходимостью учета значительного числа границ (контактов). При количественном описании тектонических нарушений месторождений рекомендуется пользоваться классификацией ВНИМИ, в основу которой положен характер распределения напряжений у плоскости сместителя как наиболее универсальный и определяющий фактор.

В «сплошных» зонах при выдержанных элементах залегания и морфологии рудных жил, в том числе при наличии полостей неправильной формы и сложной конфигурации расчетной области в разрезе, наиболее эффективно применение метода конечных элементов в плоской постановке [11]. Для решения подобных задач принято ПО «CAE Fidesys» (ООО «Фидесис», г. Москва).

Таким образом, статья посвящена рассмотрению процессов моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) разрабатываемого блочного массива

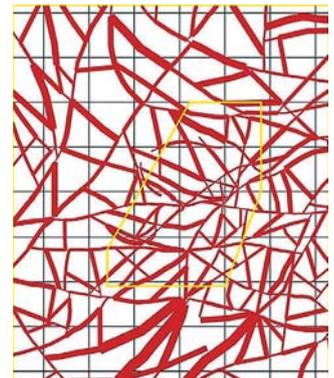
горных пород с комплексным использованием МГИУ в областях, в которых наблюдается нарушение сплошности среды, а в «сплошных» зонах – с использованием МКЭ. Материал данной статьи развивает тематику совместного применения ПО «PRESS 3D URAL» и ПО «CAE Fidesys» для решения смешанных геомеханических задач [12].

**Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) с использованием МГИУ в областях, в которых наблюдается нарушение сплошности среды**

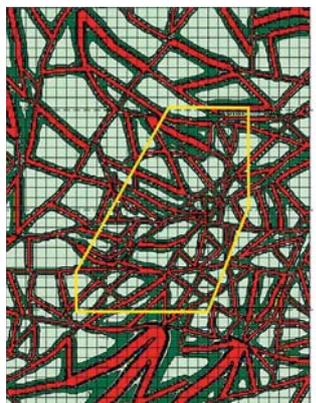
Рассмотрим основные этапы численного моделирования для оценки естественного поля напряжений типичного жильного месторождения блочного строения, включающие формирование тектонической схемы путем выделения линеаментов, расчет длины между узлами линеаментов, построение ширины зоны геодинамического влияния каждого линеаментов (рис. 1), привязку расчетных областей к координатам, формирование сетки расчетных элементов, выполнение и получение результатов расчета максимальных концентраций горизонтальных сжимающих напряжений и построение роз-диаграмм максимальных горизонтальных (тектонических) сжимающих напряжений (рис. 2).



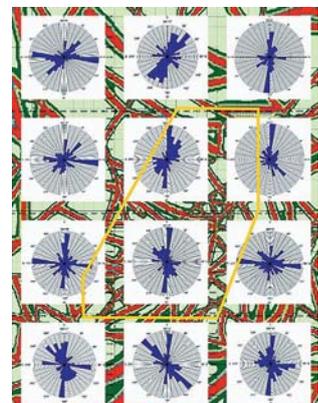
**Рис. 1**  
Выделение линеаментов, расчет длины между узлами, построение ширины зоны геодинамического влияния каждого линеаментов



**Fig. 1**  
Selection of linear structures, calculation of the distance between the nodes, plotting the width of the geodynamic impact zone of each linear structure



**Рис. 2**  
Результаты расчета величин и направлений действующих максимальных горизонтальных (тектонических) сжимающих напряжений



**Fig. 2**  
Results of calculating the values and directions of the acting maximum horizontal (tectonic) compressive stresses

Анализ полученных результатов (см. рис. 2) показывает, что концентрации максимальных горизонтальных напряжений от влияния тектонических нарушений варьируются от  $0,3\gamma H$  (светло-зеленый цвет легенды) до  $0,9\gamma H$  (синий цвет легенды).

Таким образом, максимальным главным напряжением является гравитационное, действующее в вертикальном направлении. При этом максимальные горизонтальные (тектонические) сжимающие напряжения в пределах северной, северо-восточной, центральной и юго-восточной частей горного отвода преимущественно действуют в меридиональном направлении.

В восточной части месторождения вектор действующих напряжений меняется с меридионального на широтное направление. В остальных частях месторождения отмечаются две генеральные системы – меридиональная и широтная. Минимальные напряжения  $\sigma_3$  составляют  $0,25\gamma H$  и действуют по нормали к  $\sigma_2$ .

Окончательно в качестве граничных условий к численным расчетам с применением МКЭ принимаются следующие значения: вертикальные (гравитационные) сжимающие напряжения  $\sigma_1 = \gamma H$ ; горизонтальные (тектонические) сжимающие напряжения: максимальные  $\sigma_2 = 0,6\gamma H$ ; минимальные  $\sigma_3 = 0,25\gamma H$ .

#### Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) с использованием МКЭ в «сплошных» зонах среды

Для проведения численных расчетов была построена плоская модель глубиной от поверхности 350 м, отражающая «усреднённую» горно-геологическую ситуацию, что является достаточным для оценки характера распределения напряжений вокруг извлекаемых рудных тел. Границы расчётной области заданы с учетом принципа Сен-Вена на достаточном расстоянии для обеспечения достаточной точности расчета. Плотность породной закладки определялась как плотность в насыпке с учетом средней естественной плотности рудопородного массива и коэффициента разрыхления равного 1,5. Обрушенный массив горных пород (породная закладка) приобретает свойства сыпучей среды (повышается коэффициент Пуассона до 0,35), но также и сохраняет часть упругих свойств. Принимая во внимание рекомендации проф. К.В. Руппенейта, эквивалентный модуль упругости обрушенной горной массы принимали равным 0,01 от модуля упругости нетронутого рудопородного массива [13]. Расчетная схема и этапы моделирования основных циклов отработки, включающих подготовку к отбойке камеры с пройденным подэтажным штреком, отбитую камеру, заложённую камеру с подэтажным штреком и в завершение полностью

#### Список литературы

1. Simser B.P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.005>
2. Clark M.D., Day J.J. Mineralogical and sample selection implications for geomechanical properties of intact heterogeneous and veined rocks from the Legacy skarn deposit. *Engineering Geology*. 2021;285:106067. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106067>
3. Shang J. Stress path constraints on veined rock deformation. *Rock Mechanics Bulletin*. 2022;1(1):100001. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100001>
4. Айнбиндер И.И., Овчаренко О.В. Исследования потенциальной удароопасности массива горных пород на проектируемых глубинах отработки месторождения «Валунистое». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6):35–45. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_6\\_0\\_35](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_35)
5. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л. Обоснование рациональных параметров систем разработки наклонных жил малой и средней мощности при изменении криоусловий. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2022;(2):157–168.
6. Головченко Ю.Ю., Лепехин И.С., Румянцев А.Е., Соннов М.А., Трофимов А.В. Разработка численных геомеханических моделей

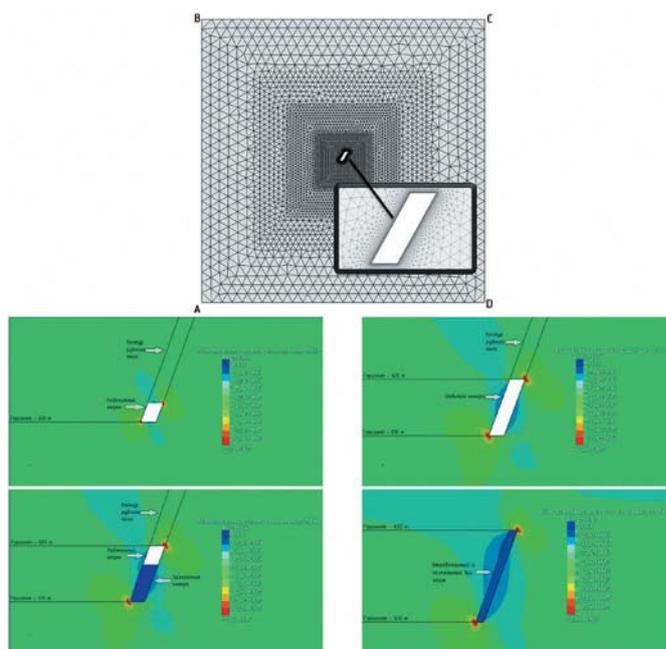


Рис. 3  
Модель и результаты расчета напряженного состояния массива горных пород при развитии горных работ

Fig. 3  
Model and results of calculating the stress state of the rock mass during the progress of mining operations

отработанный и заложённый этаж, приведены на рис. 3.

Согласно результатам численного моделирования отработка запасов не сопровождается значительным ростом сжимающих напряжений, способных к проявлению горного давления в динамической форме. Данный факт обуславливается несколькими факторами: небольшая глубина ведения горных работ (350 м), крутое падение рудных тел (в среднем 70 град), а также применяемые бесцеликовые системы разработки (камерная и слоевая). При этом расчетный коэффициент удароопасности, равный 0,3, не превышает критического 0,8, что характеризует месторождение как не опасное по горным ударам.

#### Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения комплексного геомеханического моделирования разработки жильных месторождений блочного строения с совокупным применением метода граничных интегральных уравнений (МГИУ) и метода конечных элементов (МКЭ) при решении класса задач, связанных с определением напряженно-деформированного состояния тектонически нарушенного массива горных пород, осложненного проведением горных выработок.

- с различной степенью детализации на примере шахты «Ангидрит» рудника «Кайерканский». *Горная промышленность*. 2023;(4):79–88. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-79-88>
7. Калмыков В.Н., Кульсайтов Р.В., Штыкова М.Н. Геомеханические и геодинамические особенности состояния горных работ при освоении Кочкарского месторождения золота. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2020;(1):401–409. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-401-409>
  8. Умаров А.Р., Еременко В.А. Развитие вторичного поля напряжений в условиях применения каркасной горной конструкции. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(4):77–92. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_4\\_0\\_77](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_77)
  9. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений. *Горный журнал*. 2020;(1):49–52. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.09>
  10. Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения. *Записки Горного института*. 2018;234:604–611. <https://doi.org/10.31897/PMI.2018.6.604>
  11. Мороз Н.Е., Белова М.В., Рукавишников Г.Д. Прогнозирование напряженных зон на различных этапах отработки золоторудного месторождения. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021;(8):72–81. Режим доступа: <https://www.mining-science.ru/archive/2021/8-2021/2021-8-8>
  12. Мороз Н.Е., Сидоров Д.В., Соннов М.А. Применение цифровых двойников для прогнозной оценки удароопасности надштрековых целиков. *Горная промышленность*. 2022;(3):93–98. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-93-98>
  13. Руппенейт К.В. *Деформируемость массивов трещиноватых горных пород*. М.: Недра; 1975. 223 с.

## References

1. Simser V.P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.005>
2. Clark M.D., Day J.J. Mineralogical and sample selection implications for geomechanical properties of intact heterogeneous and veined rocks from the Legacy skarn deposit. *Engineering Geology*. 2021;285:106067. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106067>
3. Shang J. Stress path constraints on veined rock deformation. *Rock Mechanics Bulletin*. 2022;1(1):100001. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100001>
4. Aynbinder I.I., Ovcharenko O.V. Potential rockburst hazard research at the project mining depth at the Valunistoe deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6):35–45. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_6\\_0\\_35](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_35)
5. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L. Parameters rationalization of mining systems for low and medium thickness flat veins under changing cryogenic conditions. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2022;(2):157–168. (In Russ.)
6. Golovchenko Yu.Yu., Lepekhin I.S., Rummyantsev A.E., Sonnov M.A., Trofimov A.V. Development of numerical geomechanical models with different levels of detail using the example of the Angidrit underground mine of the Kayerkansky ore mine. *Russian Mining Industry*. 2023;(4):79–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-79-88>
7. Kalmykov V.N., Kulsaitov R.V., Shtikova M.N. Geomechanical and geodynamic features of the state of mining operations in the development of the Kochkar gold deposit. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2020;(1):401–409. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-401-409>
8. Umarov A.R., Eremenko V.A. Secondary stress evolution in frame structure mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(4):77–92. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_4\\_0\\_77](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_77)
9. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):49–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.09>
10. Sidorov D.V., Potapchuk M.I., Sidlyar A.V. Forecasting rock burst hazard of tectonically disturbed ore massif at the deep horizons of Nikolaevskoe polymetallic deposit. *Journal of Mining Institute*. 2018;234:604–611. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.604>
11. Moroz N.E., Belova M.V., Rukavishnikov G.D. Predicting stress zones at various stages of goldfield development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyzhurnal*. 2021;(8):72–81. (In Russ.) Available at: <https://www.mining-science.ru/archive/2021/8-2021/2021-8-8>
12. Moroz N.E., Sidorov D.V., Sonnov M.A. Application of digital twins to predict rock-bump hazard of drift pillars. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):93–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-93-98>
13. Ruppeneyt K.V. *Deformability of fractured rock masses*. Moscow: Nedra; 1975. 223 p. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Мороз Никита Евгеньевич** – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

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

**Соннов Максим Александрович** – действительный член Академии горных наук, заместитель генерального директора по продажам, ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com

### Information about the authors

**Nikita E. Moroz** – postgraduate student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Russian Federation; e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

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

**Maksim A. Sonnov** – Full Member of the Academy of Mining Sciences, Deputy General Director for Sales, Fidesis LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com

### Article info

Received: 03.10.2023

Revised: 27.11.2023

Accepted: 04.12.2023

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 27.11.2023

Принята к публикации: 04.12.2023