

Формирование глобальных численных моделей мозаичной структуры с интерполированными свойствами горного массива

Ю.Ю. Головченко¹, А.Е. Румянцев¹✉, А.П. Киркин¹, А.В. Трофимов¹, М.А. Соннов²

¹ ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

✉ RumyantsevAE@nornik.ru

Резюме: В работе предложен подход к построению глобальных численных моделей мозаичной структуры с интерполированными физико-механическими свойствами массива горных пород. Методика основана на переносе данных о физико-механических характеристиках массива из геомеханических блочных моделей в конечно-элементные с учетом сложной геометрической формы геологических структур и подземных сооружений. При этом исключается усреднение свойств по крупным литологическим доменам. В основе методики лежит одновременное использование данных из нескольких блочных моделей с разной детализацией. Каждая модель имеет свою направленность: геометрическую, геомеханическую или иную. Построение сетки конечных элементов выполняется с минимальным использованием внешней CAD-геометрии, что позволяет получить лучшую численную устойчивость при решении больших задач. В рамках методики был реализован внешний модуль на языке программирования Python, использующий Gmsh в качестве генератора сетки. Апробация модуля была выполнена через интеграцию с CAE Fidesys. С использованием разработанного модуля была построена высокдетализированная глобальная численная модель рудника. Представлены результаты численного моделирования. На примере текущей геомеханической обстановки выполнена оценка адекватности численной модели.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, CAE Fidesys, блочное моделирование, мозаичная структура, критерий прочности Кулона–Мора, напряженно-деформированное состояние, массив горных пород
Для цитирования: Головченко Ю.Ю., Румянцев А.Е., Киркин А.П., Трофимов А.В., Соннов М.А. Формирование глобальных численных моделей мозаичной структуры с интерполированными свойствами горного массива. *Горная промышленность*. 2026;(4):60–66. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-60-66>

Development of global numerical honeycomb models with interpolated rock mass properties

Yu.Yu. Golovchenko¹, A.E. Rumyantsev¹ ✉, A.P. Kirkin¹, A.V. Trofimov¹, M.A. Sonnov²

¹ Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

² Fidesis LLC, Moscow, Russian Federation

✉ RumyantsevAE@nornik.ru

Abstract: A method for developing global numerical honeycomb models with interpolated physical and mechanical properties of a rock mass is proposed. The methodology is based on transferring data on the physical and mechanical characteristics of the rock mass from the geomechanical block models into the finite element models while accounting for a complex geometry of geological structures and underground excavations. This helps to avoid averaging of the properties over large lithological domains. The methodology relies on the simultaneous use of data from several block models with different levels of detail. Each model serves its own purpose, i.e. geometric, geomechanical, or other. The finite element mesh is generated with the minimal use of the external CAD geometry, which improves numerical stability in solving large-scale problems. As part of the methodology, an external module was implemented in Python using Gmsh as the mesh generator. The module was validated through integration with CAE Fidesys. A highly detailed global numerical model of a mine was constructed using the developed module. The results of numerical simulations are presented. The adequacy of the numerical model was evaluated based on the current geomechanical conditions.

Keywords: numerical modelling, finite element method, CAE Fidesys, block modelling, honeycomb structure, Coulomb-Mohr strength condition, stress-and-strain state, rock mass

For citation: Golovchenko Yu.Yu., Rumyantsev A.E., Kirkin A.P., Trofimov A.V., Sonnov M.A. Development of global numerical honeycomb models with interpolated rock mass properties. *Russian Mining Industry*. 2026;(4):60–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-60-66>

Введение

Численное моделирование является одним из важнейших инструментов оценки устойчивости и прогнозирования поведения массива горных пород при подземной и открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Современные программные комплексы, такие как Rocscience RS2, RS3, FLAC3D, Abaqus и др., позволяют моделировать перераспределение напряжений и деформаций массива и развитие зон его разрушения. Наиболее широко в таких задачах применяются: метод конечных элементов, метод конечных разностей и метод граничных элементов. Для их реализации необходимо задание физико-механических свойств пород различных литологических разностей.

Традиционно такие свойства задаются путём усреднения по литологическим или геотехническим доменам, когда каждой зоне соответствует единый набор параметров, включающий модуль упругости, коэффициент Пуассона, сцепление, угол внутреннего трения и плотность. Данный подход широко используется как в зарубежных [1; 2], так и в отечественных исследованиях [3] и остаётся стандартом в промышленной практике. Вместе с тем он имеет существенные ограничения, связанные со сглаживанием пространственной изменчивости свойств, отсутствием учёта локальных зон ослабления и допущением однородности массива в пределах выделенных доменов.

Как показано в работе [1], применение усреднённых значений свойств массива может существенно недооценивать зоны разрушения и смещения – вплоть до четырёхкратного расхождения по сравнению с консервативными сценариями. Dmitrović в сравнительном анализе методов отмечено, что усреднение свойств по доменам может приводить к неадекватной оценке напряжённого состояния, особенно в зонах локализации деформаций [2]. В работах [3; 4] при моделировании трещиноватости пород подтверждается, что усреднённые свойства не отражают истинной гетерогенности массива, что снижает достоверность прогнозов. Shapka-Fels и Elmo подчёркивают, что упрощения, связанные с усреднением, могут искажать механизмы разрушения и недооценивать риски при переходе от открытой разработки месторождений к подземной [5]. В обзоре Nikolić et al. указывается, что несмотря на распространённость моделей с заданием усреднённых физико-механических свойств современные методы (X-FEM, FEM/DEM) стремятся к более реалистичному описанию разрывов и локальных неоднородностей [6].

Отметим, что в последние годы наблюдается устойчивая тенденция к повышению детализации при проведении численного моделирования. Так, Torres в своей работе демонстрирует подход, при котором в численной модели свойства материалов присваиваются на уровне отдельных блоков согласно модели, разработанной в ГГИС Vulcan, а не усредняются по литологическим разностям [7]. Это позволило сохранить пространственную структуру данных и повысить достоверность прогнозов. Авторы исследований [8–10] подчёркивают, что наиболее точные результаты достигаются в методах, где свойства задаются на уровне отдельных элементов – частиц, контактов, связей (DEM, BPM, MD), что позволяет адекватно моделировать микроструктуру разрушения.

Особую значимость данная проблема приобретает и в отечественной практике. Так, Дубиня и соавт. в своей статье показывают, что при моделировании шельфовых месторождений с резкими изменениями свойств (мерзлота, газонасыщенные включения) традиционные методы МКЭ

становятся неадекватными, и требуется применение разрывного метода спектральных элементов для корректного учёта негладких полей [11]. Это подтверждает, что сглаживание свойств даже на границах слоёв ведёт к погрешностям, поэтому сохранение детализации является критически важным.

В смежных областях также реализуются подобные подходы. В рамках гидродинамического моделирования трещинно-порового коллектора Кашников и соавт. показывают, что проницаемость пород можно задавать на уровне отдельных элементов на основе технологии машинного обучения и геомеханики, что существенно улучшило сходимость по значениям пластового давления [12]. Однако физико-механические свойства пород в модели были приняты усреднёнными. Saksala et al. на лабораторном уровне продемонстрировали, что при численном моделировании разрушения гранита на основе реальной минералогической структуры и присвоении конкретных свойств каждому минеральному зерну удаётся точно воспроизвести механизм разрушения [13]. В области буровзрывных работ наблюдается аналогичная тенденция. Например, в работе Господарикова и соавт. показано, что усреднение параметров буровзрывных работ по всей очистной камере приводит к ошибкам в прогнозе гранулометрического состава [14]. Переход к секторному подходу, при котором конкретные параметры задаются локально, а не сразу на всю камеру, позволяет существенно повысить точность. Это подтверждает, что повышение качества детализации является универсальным путем к повышению достоверности прогнозов независимо от предметной области.

В данной работе предлагается подход к заданию физико-механических свойств в численных моделях, при котором результаты геостатистической интерполяции, полученные в Micromine, напрямую присваиваются каждому элементу расчётной сетки без этапа усреднения по доменам. Такой метод позволяет сохранить пространственную детализацию, присущую блочной геомеханической модели, избежать искажений, возникающих при агрегации свойств по доменам, повысить адекватность расчёта в зонах резкой изменчивости свойств, в том числе вблизи тектонических нарушений, а также обеспечить прямую связь между блочной геомеханической и численной моделями.

Особую значимость данный подход приобретает в условиях развития отечественного CAE-потенциала. В настоящее время в России активно развивается программный комплекс Fidesys. Его препроцессор, основанный на Coreform Cubit, поддерживает интеграцию с языком программирования Python. Хотя функция прямого импорта интерполированных свойств из блочных геомеханических моделей не реализована штатными средствами, наличие скриптового интерфейса позволяет автоматизировать передачу данных, назначение свойств на уровне элементов и построение модели при помощи внешних доработок. В частности, ранее для CAE Fidesys был предложен и реализован в виде внешнего пользовательского модуля подход к моделированию тектонических нарушений с использованием пружинных связей конечной жёсткости. Такой метод позволяет избежать сложного геометрического построения и повышает устойчивость расчёта [15].

Подобные механизмы открывают широкие возможности для создания более точных, адаптивных и технологически независимых решений в области геомеханического моделирования, что особенно актуально в условиях импортозамещения.

Методика формирования численной модели с интерполированными свойствами горных пород

Методика, предлагаемая в данной статье, ориентирована на построение глобальных численных моделей с мозаичной структурой. В подобных моделях физико-механические свойства скального массива задаются не в виде укрупненных литологических доменов, а более детализированно, что обеспечивает сохранение их пространственной изменчивости.

Основная идея разработанного подхода состоит в совместном использовании нескольких блочных моделей, которые обладают различной, необходимой для построения численной модели, информацией. В целом, стоит отметить, что максимальное количество блочных моделей не ограничено, однако в простейшем случае применяются две. Первая блочная модель ориентирована преимущественно на геометрическую составляющую. Она может включать в себя подробное воксельное представление подземных структур (маркшейдерская съемка выработок, стволов, рудоспусков) или рудных тел с этапностью отработки. Фактически она задает 3-D поле параметров для некоторой функции, которой определяется генерация сетки в Gmsh. Вторая блочная модель содержит информацию непосредственно о физико-механических свойствах массива и их пространственном изменении.

Такой подход в разделении данных между двумя блочными моделями позволяет избежать классического усреднения данных и компромиссов между точностью описания геометрии, физико-механических свойств и устойчивостью конечно-элементной аппроксимации. Использование классического подхода к построению численных моделей в связке с детальной геометрией различных литологических структур и подземных сооружений приводит к чрезмерному усложнению всей постановки задачи. Если же рассмотреть обратную ситуацию, когда данные блочной модели присваиваются некоторой заранее созданной регулярной сетке, то возрастает риск потери важных геометрических особенностей массива, а некоторые локальные изменения физико-механических характеристик, напротив, начинают влиять на напряженно-деформированное состояние массива слишком сильно. Предложенный же подход позволяет разделить ответственность за геометрическое соответствие и поле физико-механических свойств массива между разными алгоритмами. Их объединение позволяет получить численную модель с детальным описанием геометрических особенностей необходимых зон и плавным, более природным распределением параметров материала внутри скального массива.

В качестве исходной CAD-геометрии используется внешний куб рассматриваемого объема скального массива с учетом топологической поверхности, а также каркасы тектонических нарушений. Для дальнейшей работы с сеткой используется пакет Gmsh со специально разработанным для данной задачи внешним расширением [16]. Использование Gmsh в рамках предоставленной методики обосновано его открытым кодом и гибкостью настроек. Благодаря этому появляется возможность удобной разработки необходимых инструментов для решения сеточных задач.

На первом этапе работы геометрическая блочная модель (ГБМ) рассматривается как основа формирования мозаичного поля размеров конечных элементов численной модели. Это означает, что конечно-элементная сетка должна не просто точно повторять границы блоков, но и быть относительно сглаженной на этой границе. Кроме того,

стоит отметить, что для жизнеспособности численной модели характерный размер конечного элемента не должен быть равен или быть меньше характерного размера блока. Также сетка должна быть адаптивной. Другими словами, в местах низкого интереса она разрежается, в местах высокого (границные слои) – сгущается. Физико-механическая блочная модель (ФМБМ) на этом этапе воспринимается как вспомогательная, однако также участвует в формировании сетки конечных элементов. Для регуляции геометрического вклада от различных блочных моделей была предусмотрена система приоритетов. Так, наивысший приоритет устанавливается для ГБМ, как основного носителя информации. Задачей ФМБМ является контроль размеров конечных элементов в местах изменения материала.

На следующем этапе выполняется учет тектонических нарушений. На данном шаге используется алгоритм, описанный авторами в работе [15]. Основным нововведением является то, что тектонические нарушения вводятся не как плоскости, разрезающие внешний куб массива, а как некоторые внутренние фиктивные интерфейсы, по которым создается разрыв конечно-элементной сетки. Впоследствии для узлов, расположенных на данном разрыве, вводятся связи конечной жесткости, которые учитывают характеристики заполнителя разлома. Такой метод позволяет сохранить общую геометрическую целостность и одновременно учесть ослабления массива, что позволяет не только ввести крупные тектонические нарушения, но и задавать системы трещин в явном виде.

Третий этап заключается в индексации конечных элементов данными из ГБМ и ФМБМ. Фактически происходит объединение элементов в некоторые логические подмножества, которые несут информацию о принадлежности элемента к определенной геометрической структуре и физико-механическому домену. Подобный шаг позволяет получить на выходе списки элементов, разделенные по наличию определенных материальных и геометрических меток. Стоит отметить, что в зависимости от необходимости можно использовать различные дополнительные метки, например порядок отработки, или дополнительные параметры для удобства постобработки. Кроме того, такая структура значительно облегчает дальнейшую работу в расчетной среде, где уже непосредственно присваиваются граничные условия и внутренние идентификаторы материала.

Четвертый этап заключается непосредственно в импорте полученной сетки конечных элементов в расчетный комплекс. В случае с CAE Fidesys возникла характерная проблема несогласованности индексов узлов и элементов до и после импорта. Данная проблема является принципиальной при объединении элементов в блоки внутри расчетной среды и при задании поузловых жесткостных характеристик разрывов. Ввиду этого использовался дополнительный модуль, который на основе сопоставления геометрических данных исходной и импортированной сетки восстанавливал соответствие между индексами узлов и элементов. Также данный модуль, используя внутренний скриптовый язык CAE Fidesys, преобразует рассчитанные жесткости тектонических нарушений в команды для их непосредственного задания внутри выбранной расчетной среды.

Примеры визуализации сформированных блоков интрузии и складчатого массива представлены на рис. 1.

Пятый этап состоит в заключительной сборке численной модели. В CAE Fidesys задаются граничные условия, блокам

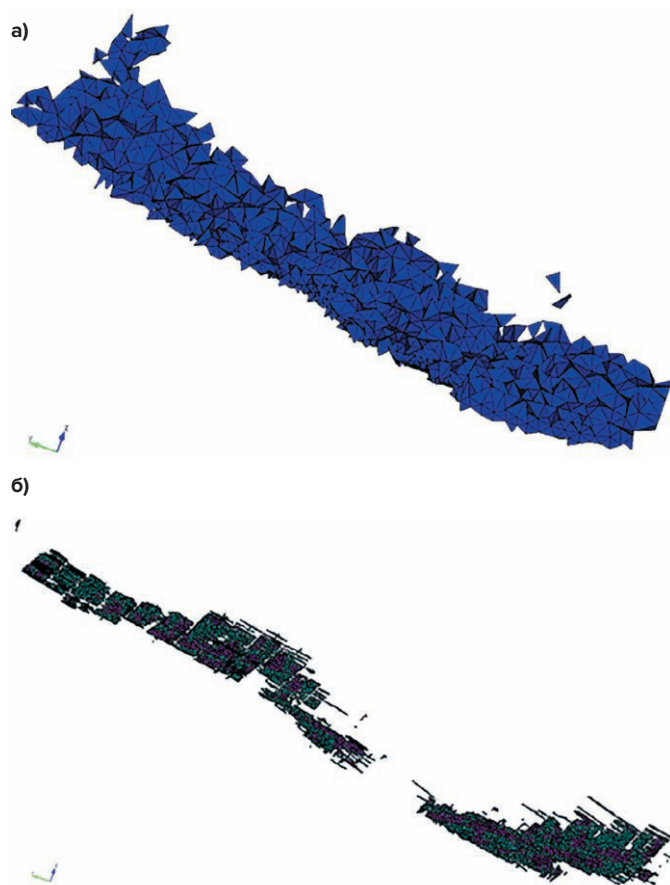


Рис. 1
Визуализация
сформированных блоков:
а – интрузия; б – закладочный
массив

Fig. 1
A visualization of the formed
blocks: а – an intrusion;
б – the filling mass

присваиваются физико-механические свойства, создаются связи конечной жесткости для тектонических нарушений и формируется логика пошагового расчета.

Важной особенностью разработанного модуля является то, что он не привязан к какой-либо одной расчетной платформе. В данной работе его апробация проведена в среде CAE Fidesys, поэтому практическая реализация подхода рассматривается именно на примере этого программного комплекса. Вместе с тем структура модуля и принципы его построения позволяют использовать его и в других задачах такого класса.

Пример разработанной численной модели

Представленный подход позволил сформировать глобальную численную модель рудника с высокой степенью детализации, включая в себя точную (фактическую) геометрию отработанных и заложенных камер, обрабатываемых камер, отработанных и планируемых к закладке камер, а также пройденных протяженных горных выработок. Это позволяет более качественно подойти к обоснованию геомеханических рисков, а именно оценке напряженного состояния в междуканальных рудных целиках, зоны опорного давления на флангах панелей, развитию зон растягивающих напряжений в кровле выработок.

В качестве примера реализации представленного подхода к численному моделированию представлена пошаговая модель рудника, обрабатывающего месторождение, отнесенное к склонным и опасным по горным ударам (рис. 2).

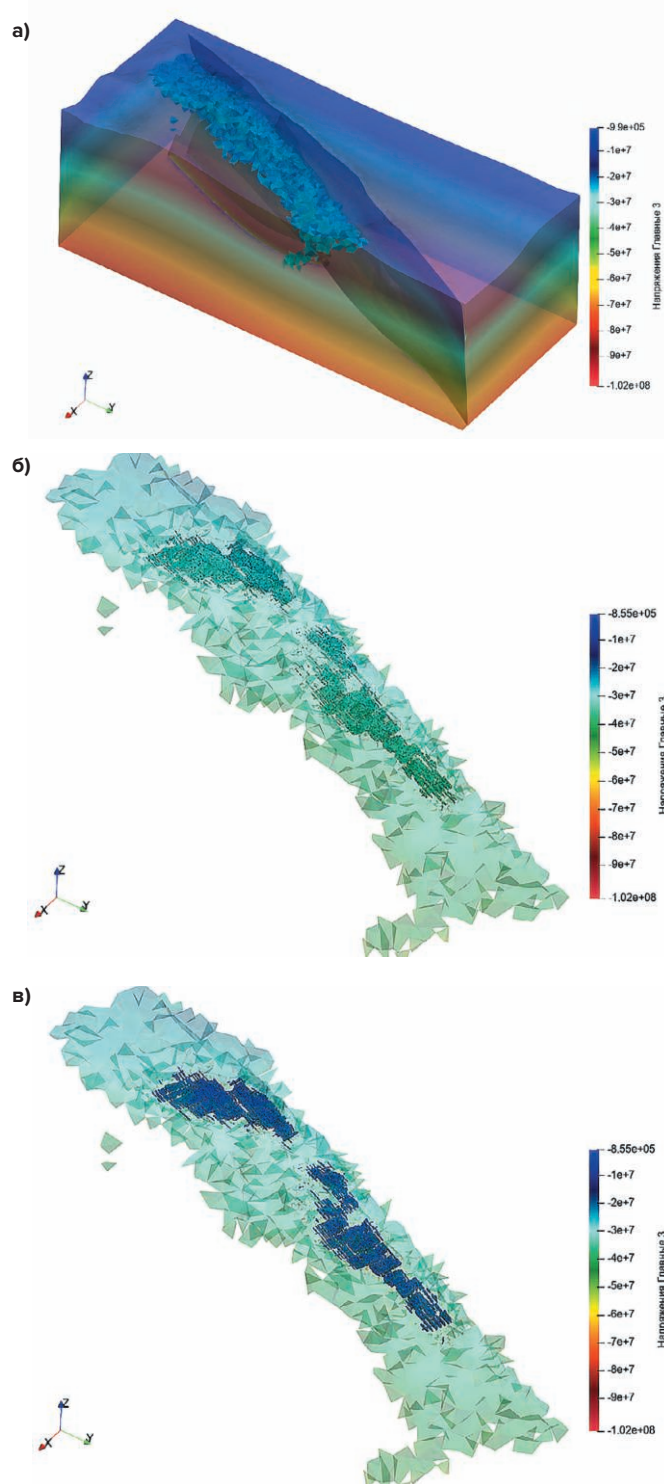


Рис. 2
Результаты численного
моделирования напряженного
состояния (Па) массива горных
пород рудника:
а – общий вид модели;
б – напряженное состояние
в интрузии до отработки;
в – напряженное состояние в
интрузии в процессе отработки

Fig. 2
Results of numerical
modelling of the rock mass
stress state (Pa) in the mine:
а – a general view of the
model;
б – the stress state in the
intrusion prior to mining;
в – the stress state in the
intrusion during mining

В данном примере численная модель реализована в упругой постановке, поэтому оценка состояния массива горных пород производится с учетом значения запаса прочности по критерию Кулона–Мора. На рис. 3 представлены участки обрабатываемого рудного тела, где запас

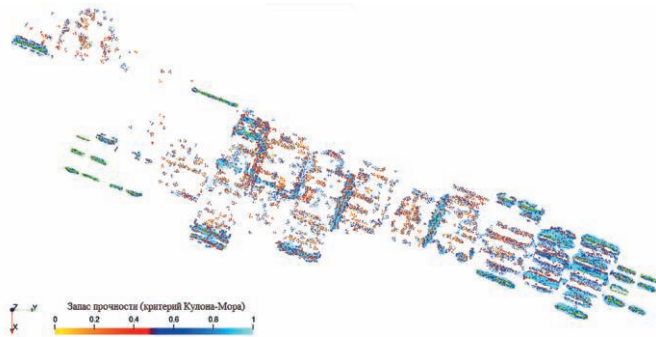


Рис. 3
Выделенные зоны
отрабатываемого рудного тела
с запасом прочности по
критерию Кулона–Мора ниже 1

Fig. 3
The identified zones of the
mined ore body with the
safety factor according to the
Coulomb–Mohr strength
condition below 1

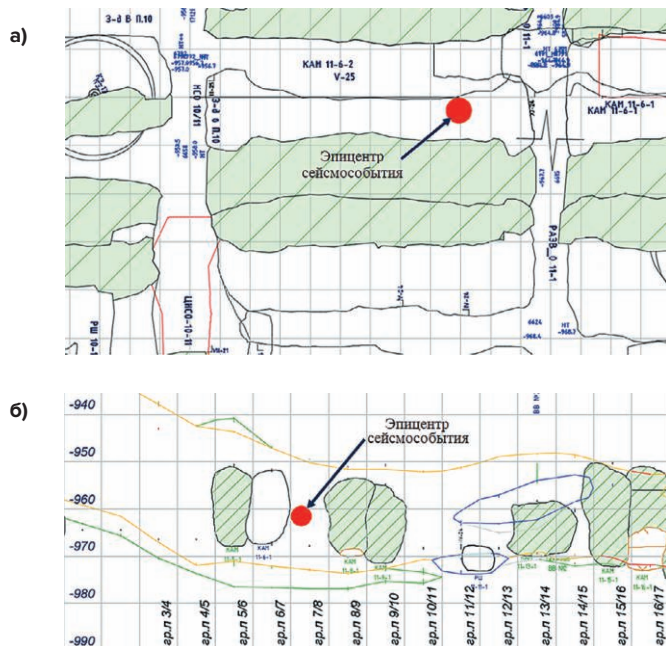


Рис. 4
Сопоставление места возникновения сейсмособытия
с результатами численного моделирования:
а – план по почве рудного тела; б – вертикальный разрез;
в – распределение максимальных главных напряжений по
вертикальному разрезу; г – запас прочности по критерию
Кулона–Мора

прочности ниже 1, то есть зоны потенциального разрушения. В эти зоны преимущественно попадают приконтурный массив вокруг горных выработок, неотработанные рудные междукamerные целики.

Такие зоны потенциально опасны в плане хрупкого разрушения, что может привести к проявлению горного давления в динамической форме. В качестве примера представлено сопоставление результатов численного моделирования и места эпицентра сейсмособытия в междукamerном рудном целике (рис. 4). По результатам моделирования видно, что в междукamerных рудных целиках, сформированных между закладочным массивом, достаточно высокие значения максимальных главных напряжений и запас прочности по критерию Кулона–Мора ниже 1. При этом целик, в котором произошло сейсмособытие,

не окружен закладочным массивом со всех сторон: с западной стороны камера отработана, но не заложена, что и могло послужить проявлению сейсмоактивности на данном участке. В остальных случаях целики со всех сторон окружены закладочным массивом, и несмотря на низкий запас прочности целики находятся в зажатой среде и их поведение можно охарактеризовать как упругопластическое. Однако это не снимает необходимость контроля и прогноза удароопасности массива.

Подробное понимание формирования таких зон потенциального разрушения, глубины их распространения, наличия рядом свободных поверхностей, особенно в рамках удароопасных месторождений, позволяет более обоснованно подойти в частности к вопросам прогноза и предупреждения проявления горного давления в динамической форме, выявления наиболее нагруженных участков массива горных пород, определения глубины формирования защитных/защищенных зон. В целом такой подход позво-

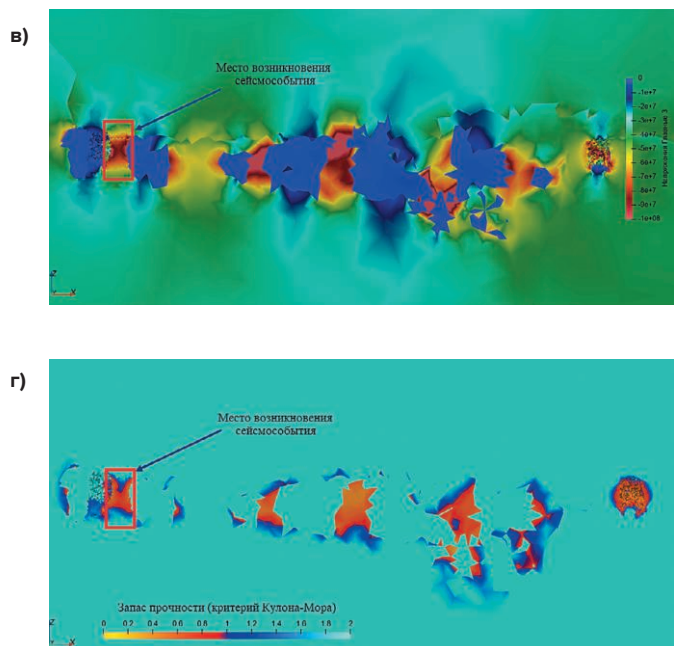


Fig. 4
A comparison of the seismic event location with the results of the numerical modelling: а – a plan view along the ore body base surface; б – a vertical cross-section; в – distribution of the maximum principal stresses along the vertical cross-section; г – safety factor according to the Coulomb–Mohr strength condition

ляет подойти к вопросу планирования очистных работ: порядка отработки камер, приоритета ведения закладочных работ с учетом текущей геомеханической обстановки.

Заключение

В рамках исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород при подземной отработке месторождения разработана методика формирования глобальных численных моделей мозаичной структуры, позволяющая переносить интерполированные физико-механические свойства массива горных пород в конечно-элементную модель без предварительного усреднения по укрупненным доменам.

Представлено, как совместное использование двух блочных моделей (геометрической и параметрической) позво-

ляет сохранить мозаичное строение расчётной области и задать более согласованное распределение свойств материала в численной модели.

В состав методики включён учёт тектонических нарушений в виде интерфейсных связей конечной жёсткости, что даёт возможность вводить разрывные структуры в глобальную модель без чрезмерного усложнения её геометрии.

Предложенная схема включает индексацию конечно-элементной сетки, формирование групп элементов, импорт модели в расчётный комплекс и восстановление соответствия между объектами исходной и импортированной сеток. Это обеспечивает целостность вычислительного контура: от блочной геомеханической модели до расчётной постановки.

Разработанный программный модуль является внешним универсальным генератором сетки, который способен учитывать заданное пространственное поле геометрических характеристик конечных элементов. В настоящей ра-

боте его практическая апробация выполнена в связке с CAE Fidesys, что позволило реализовать предложенный подход в рамках отечественной расчётной среды.

Решение задачи, рассмотренной во второй части статьи, подтвердило работоспособность методики и её применимость при построении численных моделей, в которых необходимо учитывать пространственную изменчивость свойств массива горных пород, влияние структурных неоднородностей и текущего состояния горных работ.

Представленные результаты численного моделирования находят свое подтверждение существующим положением дел при ведении горных работ. Рассмотрен случай проявления сейсмособытия в междукammerном целике. Результаты моделирования продемонстрировали совокупность факторов, которые могли привести к его проявлению: высокий уровень напряжений, низкий запас прочности по критерию Кулона–Мора, наличие с западной стороны отработанной и незаложенной камеры.

Список литературы / References

1. Maikowski P., Niedbalski Z., Balarabe T. A statistical analysis of geomechanical data and its effect on rock mass numerical modeling: a case study. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2021;8(2):312–323. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00369-2>
2. Dmitrovic N. Comparison of numerical modeling methods for operational rock mechanics. In: *23rd Canadian Rock Mechanics Symposium, RockEng 2025*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/394523329_Comparison_of_Numerical_Modeling_Methods_for_Operational_Rock_Mechanics (accessed: 19.03.2026).
3. Гайнанов Ш.Х., Аптуков В.Н., Середин В.В. Математическое моделирование трещиноватости пород в пределах локальных структур. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*. 2024;335(1):184–193. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4541>
Gaynanov Sh.Kh., Aptukov V.N., Seredin V.V. Mathematical modeling of rocks fracture within local structures. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2024;335(1):184–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4541>
4. Холодилов А.Н., Кириленко В.И., Шевченко П.Р., Самосенко И.В. Изменение коэффициента запаса устойчивости физической модели системы разработки с учетом расположения и параметров глинистых пропластков. *Горный журнал*. 2025;(6):81–86. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.06.12>
Kholodilov A.N., Kirilenko V.I., Shevchenko P.R., Samosenko I.V. Change in stability factor of physical model of mining system with regard to location and parameters of clayey interbeds. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(6):81–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.06.12>
5. Shapka-Fels T., Elmo D. Numerical modelling challenges in rock engineering with special consideration of open pit to underground mine interaction. *Geosciences*. 2022;12(5):199. <https://doi.org/10.3390/geosciences12050199>
6. Nikolić M., Roje-Bonacci T., Ibrahimbegović A. Overview of the numerical methods for the modelling of rock mechanics problems. *Tehnicki Vjesnik*. 2016;23(2):627–637. <https://doi.org/10.17559/TV-20140521084228>
7. Torres V.F.N. Full use of hydrogeological-geomechanical parameters for 3D stability analysis in an open-pit iron mine with complex geometry. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2025;13(2):136–160. <https://doi.org/10.4236/gep.2025.132010>
8. Bobet A., Fakhimi A., Johnson S., Morris J., Tonon F., Yeung M.R. Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009;135(11):1547–1561. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000133)
9. Wei X., Li Z., Zhao G. A review of multiscale numerical modeling of rock mechanics and rock engineering. *Deep Underground Science and Engineering*. 2025;4(3):382–405. <https://doi.org/10.1002/dug2.12127>
10. Господариков А.П., Кириленко В.И., Мильков А.С., Шиленко С.Ю. Определение параметров модели руд и горных пород рудника «Заполярный» для дискретного моделирования процесса выпуска руды под обрушенными породами. *Горный журнал*. 2025;(9):13–19. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.09.02>
Gospodarikov A.P., Kirilenko V.I., Milkov A.S., Shilenko S.Yu. Model parameters of ore and rock mass in Zapolyarny Mine for discrete modeling of ore drawing under caved rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(9):13–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.09.02>

11. Dubinya N.V., Vershinin A.V., Pirogova A.S., Tikhotsky S.A. On numerical modeling of reservoir geomechanical problems with non-smooth solutions using finite element method. 2022;23(1):30–48. Geophysical Research. <https://doi.org/10.21455/gr2022.1-3>
12. Кашников Ю.А., Шустов Д.В., Якимов С.Ю. Учет геомеханического состояния трещинно-порового коллектора при гидродинамическом моделировании. *Записки Горного института*. 2025;271:42–52. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16217> (дата обращения: 14.03.2026).
Kashnikov Y.A., Shustov D.V., Yakimov S.Y. Consideration of the geomechanical state of a fractured porous reservoir in reservoir simulation modelling. *Journal of Mining Institute*. 2025;271:42–52. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16217> (accessed: 14.03.2026).
13. Saksala T., Ruiz A.R., Bhusare S., Mohanty G., Coudert T., Dumoulin S. et al. Numerical modelling of frictional sliding induced damage and heating effects on rock with an application to Sievers' j-miniature drilling on granite. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2025;49(11):2634–2654. <https://doi.org/10.1002/nag.4005>
14. Господариков А.П., Ковалевский В.Н., Румянцев А.Е., Кириленко В.И. Адаптация модели прогнозирования гранулометрического состава Кузнецова–Раммлера для условий подземных горных работ. *Горный журнал*. 2026;(2):72–79. <https://doi.org/10.17580/gzh.2026.02.09>
Gospodarikov A.P., Kovalevskiy V.N., Rumyantsev A.E., Kirilenko V.I. Adapting the Kuz–Ram fragmentation model to underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2026;(2):72–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2026.02.09>
15. Головченко Ю.Ю., Румянцев А.Е., Лалин В.В., Соннов М.А. Моделирование тектонических нарушений с применением связей конечной жёсткости с интеграцией в CAE Fidesys. *Горная промышленность*. 2025;(4):78–84. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-78-84>
Golovchenko Yu.Yu., Rumyantsev A.E., Lalin V.V., Sonnov M.A. Modeling of tectonic faults using finite stiffness links with integration in CAE Fidesys. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):78–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-78-84>
16. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2009;79(11):1309–1331. <https://doi.org/10.1002/nme.2579>

Информация об авторах

Головченко Юрий Юрьевич – старший научный сотрудник лаборатории геотехники, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2980-2173>; e-mail: GolovchenkoYuYu@nornik.ru

Румянцев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией геотехники, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2204-961X>; e-mail: RumyantsevAE@nornik.ru

Кирикин Александр Павлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотехники, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4830-8042>; e-mail: KirkinAP@nornik.ru

Трофимов Андрей Викторович – кандидат технических наук, директор департамента научно-технического развития, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7557-9801>; e-mail: Trofimovav@nornik.ru

Соннов Максим Александрович – действительный член Академии горных наук, заместитель генерального директора, ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0004-3932-5571>; e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.03.2026

Поступила после рецензирования: 04.05.2026

Принята к публикации: 25.05.2026

Information about the authors

Yuriy Yu. Golovchenko – Senior Research Associate, Laboratory of Geotechnical Engineering, Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2980-2173>; e-mail: GolovchenkoYuYu@nornik.ru

Alexandr E. Rumyantsev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Geotechnical Engineering Laboratory, Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2204-961X>; e-mail: RumyantsevAE@nornik.ru

Alexander P. Kirkin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Laboratory of Geotechnical Engineering, Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4830-8042>; e-mail: KirkinAP@nornik.ru

Andrey V. Trofimov – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Department for Research and Technical Development, Gipronickel Institute LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7557-9801>; e-mail: Trofimovav@nornik.ru

Maksim A. Sonnov – Full Member of the Academy of Mining Sciences, Deputy General Director of Fidesys LLC, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0004-3932-5571>; e-mail: sonnov@cae-fidesys.com

Article info

Received: 02.03.2026

Revised: 04.05.2026

Accepted: 25.05.2026