

# Моделирование тектонических нарушений с применением связей конечной жёсткости с интеграцией в CAEFidesys

Ю.Ю. Головченко<sup>1</sup>, А.Е. Румянцев<sup>1</sup>, В.В. Лалин<sup>2,3</sup>, М.А. Соннов<sup>4</sup>✉

<sup>1</sup> ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

✉ Sonnov@cae-fidesys.com

**Резюме:** В статье представлена оригинальная методика моделирования тектонических нарушений в массивах горных пород с использованием связей конечной жёсткости, разработанная в рамках подхода метода конечных элементов. В отличие от традиционных методов, требующих явного построения геометрии разломов и сопряжения их с другими структурными элементами модели, предложенный подход позволяет задать тектонические нарушения в неявной форме. Это достигается путём введения специальных пружинных элементов между узлами сетки, обладающих регулируемой жёсткостью в определённых направлениях. Такой способ описания ослабленных зон не требует модификации основной геометрии модели, упрощает её топологию и повышает устойчивость численного расчёта.

Методика реализована в виде автономной надстройки, написанной на языке Python, и используется совместно с отечественным программным комплексом CAEFidesys. Надстройка автоматически формирует список связей конечной жёсткости по заданным координатам разломов, назначает параметры жёсткости и интегрируется в расчётную схему без необходимости вмешательства в интерфейс базовой программы. Разработанный инструмент протестирован на ряде задач геомеханики и успешно верифицирован на основе сравнений с теоретическими и эмпирическими результатами. Кроме того, в статье приводятся рекомендации по выбору параметров пружинных элементов в зависимости от геологического строения массива, степени тектонической нарушенности и особенностей инженерной задачи.

Разработанная методика может быть эффективно использована при проектировании горных выработок, инженерной оценке устойчивости пород в сейсмоактивных районах, а также при геомеханическом сопровождении освоения месторождений. Её применение особенно актуально в условиях сложной геологической структуры и наличия множественных пересекающихся разломов, где классические методы моделирования сталкиваются с серьёзными вычислительными и методологическими ограничениями.

**Ключевые слова:** тектонические нарушения, численное моделирование, метод конечных элементов, связи конечной жёсткости, CAEFidesys, ослабленные зоны, геомеханика, пружинные элементы, инженерная геология

**Для цитирования:** 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>

# Modeling of tectonic faults using finite stiffness links with integration in CAE Fidesys

Yu.Yu. Golovchenko<sup>1</sup>, A.E. Rumyantsev<sup>1</sup>, V.V. Lalin<sup>2,3</sup>, M.A. Sonnov<sup>4</sup>✉

<sup>1</sup> Gipronickel Institute, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Politehnik University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup> Fidesis LLC, Moscow, Russian Federation

✉ Sonnov@cae-fidesys.com

**Abstract:** This paper presents an original methodology for modeling tectonic faults in rock masses using finite stiffness links, developed within the framework of the finite element method. Unlike traditional approaches that require explicit construction of the fault geometry and its integration with the other structural elements of the model, the proposed method allows tectonic faults to be defined implicitly. This is achieved through the introduction of special spring elements between the mesh nodes, which have

adjustable stiffness in the specified directions. This approach to representing weakened zones eliminates the need to modify the base geometry of the model, simplifies its topology, and improves the stability of numerical calculations.

The methodology is implemented as a standalone Python-based module and is used in conjunction with the domestic CAE Fidesys software package. The module automatically generates a list of finite stiffness links based on the input coordinates of the faults, assigns the stiffness parameters, and integrates them into the computational model without modifying the graphical interface of the main program. The developed tool has been tested on a number of geomechanical problems and it has been successfully verified through comparisons with theoretical and empirical results. In addition, the article provides recommendations for selecting the spring element parameters based on the geological structure of the rock mass, the degree of tectonic fracturing, and the specific features of the engineering problem.

The developed methodology can be efficiently applied in designing of mining excavations, engineering assessment of rock stability in seismically active regions, and geomechanical support of mining projects. Its use is particularly relevant in conditions of complex geological structures and multiple intersecting faults, where classical modeling methods face significant computational and methodological limitations.

**Keywords:** tectonic faults, numerical modeling, finite element method, finite stiffness links, CAE Fidesys, weakened zones, geomechanics, spring elements, engineering geology

**For citation:** 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>

## Введение

Моделирование тектонических нарушений в массивах горных пород представляет собой одну из ключевых задач современной геомеханики. Тектонические разломы существенно влияют на напряжённо-деформированное состояние массива, гидродинамические процессы и устойчивость горных выработок, особенно в условиях сложной геологической структуры и высокой сейсмической активности [1; 2]. Традиционные подходы к моделированию разломов, основанные на упрощённых схемах или эмпирических зависимостях, зачастую не обеспечивают необходимой точности при прогнозировании поведения массива вблизи тектонических нарушений [3].

В последние годы наблюдается активное развитие численных методов, позволяющих более точно учитывать влияние тектонических разломов на механическое поведение горных пород. Особое внимание уделяется методу конечных элементов (МКЭ), который зарекомендовал себя как эффективный инструмент для решения задач геомеханики [4]. Однако стандартные реализации МКЭ не всегда позволяют адекватно моделировать поведение разломов, особенно в случаях их сложной геометрии и неоднородных механических свойств [5].

Одним из перспективных направлений является применение связей конечной жёсткости для моделирования тектонических нарушений. Данный подход позволяет учитывать ослабленные зоны в расчётной схеме, моделируя разломы как элементы с пониженной жёсткостью, что обеспечивает более реалистичное воспроизведение их влияния на напряжённо-деформированное состояние массива [6; 7]. Применение связей конечной жёсткости также упрощает процесс построения моделей, снижая требования к качеству сетки и позволяя эффективно учитывать сложную геометрию разломов [8].

В последние годы в зарубежной научной литературе наблюдается устойчивый интерес к численному моделированию тектонических нарушений с учётом конечной жёсткости. В работах исследуются механизмы изгиба, скольжения и проскальзывания вблизи разломов с помощью двумерных и трёхмерных конечных элементных моделей, позволяющих учитывать сложную геомеханику взаимодействия

слоёв литосферы [9; 10]. Отдельное внимание уделяется влиянию порового давления и его скорости изменения на индуцированное скольжение, что имеет важное значение для оценки сейсмических рисков [11]. Современные обзоры подчёркивают необходимость моделирования больших деформаций в геосреде с использованием методов, адаптированных к жёстким материалам [12], а также важность верификации численных моделей с помощью полуаналитических решений [13].

Отечественные исследования также подтверждают эффективность применения связей конечной жёсткости для моделирования тектонических нарушений. В работе [14] рассмотрены методы моделирования и управления надёжностью функционирования горных выработок, включая численные подходы к учёту тектонических разломов. Исследование [15] посвящено геопространственному моделированию рельефа местности и тектонической нарушенности массива горных пород, предлагая методику построения трёхмерной модели рельефа с прогнозной оценкой тектонической нарушенности. В статье [16] анализируются геодинамически активные структуры западного фланга Талнахской тектономагматической системы, подчёркивая необходимость учёта тектонических нарушений при проектировании горных работ. Работа [17] описывает построение 1D геомеханической модели для сложных горно-геологических условий на примере месторождения Южного Каспия, учитывая влияние тектонических нарушений. В исследовании [18] представлен анализ напряжённо-деформированного состояния моделей разрывных нарушений с использованием метода конечных элементов.

Несмотря на значительный прогресс в данной области, остаются нерешёнными вопросы, связанные с выбором параметров связей конечной жёсткости, их калибровкой на основе геологических и геофизических данных, а также интеграцией разработанных моделей в существующие программные комплексы для численного моделирования.

Настоящая работа направлена на разработку методики задания тектонических нарушений с использованием связей конечной жёсткости в рамках метода конечных элементов с использованием CAE Fidesys. Предложенный подход позволяет учитывать геометрию и механические

свойства разломов, обеспечивая более точное моделирование их влияния на напряжённо-деформированное состояние массива. В работе представлены результаты численного моделирования, демонстрирующие эффективность разработанной методики, а также рекомендации по выбору параметров связей конечной жёсткости.

#### Методика моделирования тектонических нарушений при помощи связей конечной жёсткости

Моделирование тектонических нарушений в численных моделях при помощи твёрдых тел сопряжено с рядом трудностей как с точки зрения постановки задачи, так и в части её вычислительной реализации. Одной из ключевых проблем является необходимость точного геометрического сопряжения многочисленных тектонических нарушений между собой, особенно в условиях сложной геологической обстановки (рис. 1). При этом важно обеспечить корректное отображение как формы, так и пространственной ориентации каждой из разломных структур, что требует значительных временных и вычислительных ресурсов.

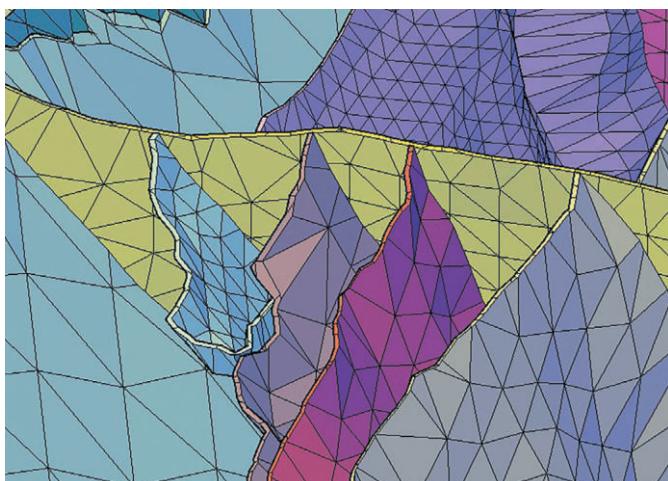


Рис. 1  
Сопряжение тектонических нарушений, моделируемых твердыми телами

Fig. 1  
Integration of tectonic faults modeled by rigid bodies

Дополнительные сложности возникают при необходимости моделирования участков пересечения тектонических нарушений с другими геологическими телами, в частности, с отрабатываемыми или разрабатываемыми горными массивами. Для этого, как правило, приходится создавать дополнительные геометрические объекты, точно соответствующие зонам пересечения (рис. 2). Эти объекты должны быть согласованы с общей сеткой конечных элементов и обладать соответствующими физико-механическими свойствами, отражающими ослабленную зону. Подобные задачи требуют высокой точности в построении расчетной схемы и продуманного выбора параметров модели, а также могут существенно усложнять её топологию, что, в свою очередь, влияет на сходимость и стабильность численного решения.

Для снижения трудоёмкости моделирования тектонических нарушений была разработана новая методика, позволяющая задавать их в неявной форме, без необходимости явного построения геометрии разломов. В основе данной методики лежит применение связей конечной жёсткости (так называемых «пружин»), которые вводятся в расчётную модель как элементы, связывающие узлы сетки и обладаю-

щие заданной жёсткостью в одном или нескольких направлениях (рис. 3).

Такая формализация позволяет моделировать ослабленные зоны, соответствующие тектоническим разломам, путём локального уменьшения жёсткости в определённых направлениях с учётом мощности тектонического нарушения без необходимости внесения критических изменений в основную геометрию массива. Благодаря этому существенно упрощается процесс построения моделей, особенно в случаях со сложной конфигурацией разломов или их множественными пересечениями.

Кроме того, использование связей конечной жёсткости обеспечивает гибкость при задании параметров – жёсткость можно варьировать в зависимости от геологических данных, а также учитывать анизотропию, неоднородность и различные стадии развития разломных зон. Такой подход позволяет имитировать как полное разрушение сцепления пород по плоскости нарушения, так и частичную деградацию механических свойств, что делает модель более реалистичной и адаптируемой к различным геомеханическим сценариям.

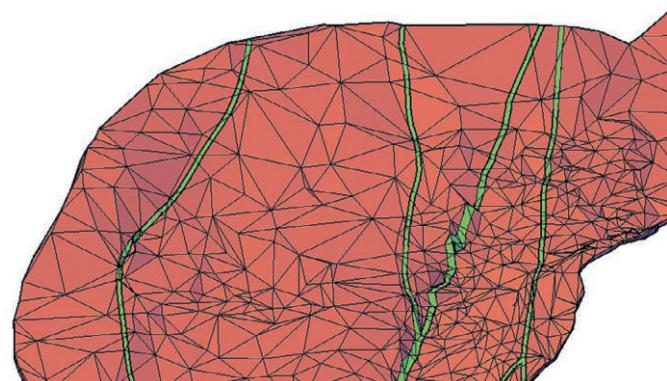


Рис. 2  
Участки пересечения тектонических нарушений и отрабатываемого массива (зелёный цвет)

Fig. 2  
Intersection areas of tectonic faults and the mined rock mass (green color)

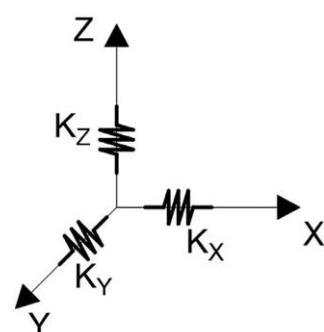


Рис. 3  
Связи конечной жёсткости

Fig. 3  
Links of finite stiffness

Методика эффективно интегрируется в существующие программные комплексы (например, CAE Fidesys), основанные на методе конечных элементов, и демонстрирует высокую вычислительную эффективность при сохранении достоверности результатов, что делает её перспективной для широкого применения в задачах инженерной геологии, горного дела и сейсмостойкого проектирования.

Общая методика задания тектонических нарушений связями конечной жесткости сводится к следующим шагам:

1. Моделирование геометрии тектонических нарушений в САПР AutoCAD или аналогах в виде трехгранной сети.
2. Разрезка твердых тел численной модели по местам прохождения тектонических нарушений.
3. Генерация конформной сетки конечных элементов в численной модели и разрыв узлов по плоскостям разрезов.
4. Определение основных характеристик тектонического нарушения (толщина и модуль упругости).
5. Вычисление эквивалентных жесткостей для каждой пары узлов тектонического нарушения. Вычисление производится для локальной системы координат каждой связи, где  $OY_{лок}$  – ось, перпендикулярная плоскости тектоники в данной точке,  $OY_{лок}$  и  $OY_{лок}$  – оси, находящиеся в плоскости тектоники в данной точке. Расчет жесткостей выполняется по формулам:

$$K_{x_{лок}} = \frac{E \cdot A}{t}; \quad (1)$$

$$K_{y_{лок}} = \frac{12 \cdot E \cdot I_y}{t^3}; \quad (2)$$

$$K_{z_{лок}} = \frac{12 \cdot E \cdot I_z}{t^3}. \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости тектоники, Па;  $A$  – площадь эквивалентного участка,  $\text{м}^2$ ;  $I_y, I_z$  – моменты инерции относительно локальных осей,  $\text{м}^4$ ;  $t$  – мощность тектоники, м.

Фактически используемые формулы являются элементами матрицы жесткости стержня Бернбули–Эйлера, которые соответствуют перемещению стержня по трем направлениям.

6. Задание связей конечной жесткости по трем направлениям для каждой пары узлов.

#### Верификация методики в CAEFidesys

Для верификации методики был выполнен расчет бруса с ослабленным участком (эквивалент тектонического нарушения) правильной формы. Общий вид и размеры расчетной схемы приведены на рис. 4.

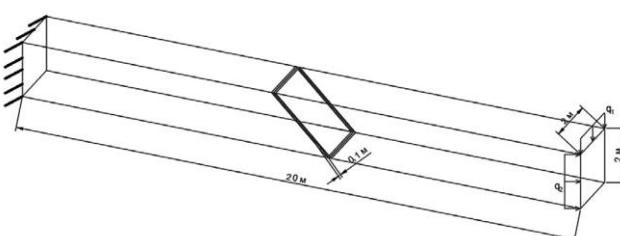


Рис.4.  
Общий вид расчетной схемы

Fig. 4  
A general view of the computational model

Брус жестко заделан с одной стороны и загружен двумя распределенными силами ( $q_1=100000 \text{ Н/м}$ ,  $q_2=50000 \text{ Н/м}$ ) с другой. Модуль упругости основной части бруса  $E_{бруса} = 10^{10} \text{ Па}$ , модуль упругости ослабленной зоны  $E_{конт} = 10^8 \text{ Па}$ . В результате сформированы и рассчитаны две модели: с ослабленной зоной, заданной твердым телом, и с ослабленной зоной, заданной связями конечной жесткости.

Общий вид численной модели приведен на рис. 5.

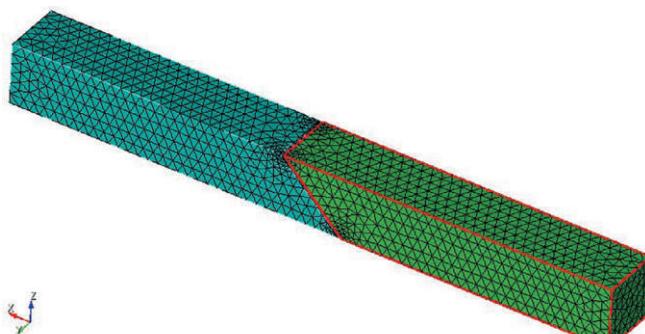


Рис.5  
Общий вид численной модели

Fig.  
A general view of the numerical model

Сравнение моделей выполнялось по максимальному значению перемещений по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ . Результаты расчета приведены на рис. 6–8.

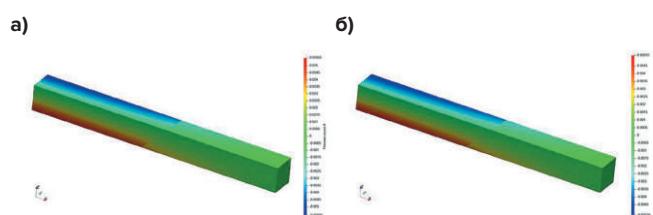


Рис. 6  
Сравнение перемещений по  $OX$ : а – твердое тело,  $\delta_{\max} = -0,00562 \text{ м}$ ; б – связи конечной жесткости,  $\delta_{\max} = -0,00519 \text{ м}$

Fig. 6  
Comparison of displacements along  $OX$ : a – a solid body,  $\delta_{\max} = -0,00562 \text{ m}$ ; b – links of finite stiffness,  $\delta_{\max} = -0,00519 \text{ m}$

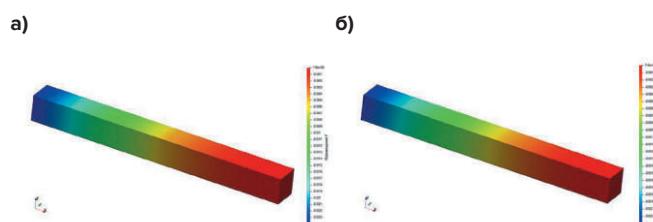


Рис. 7  
Сравнение перемещений по  $OY$ : а – твердое тело,  $\delta_{\max} = -0,0245 \text{ м}$ ; б – связи конечной жесткости,  $\delta_{\max} = -0,0224 \text{ м}$

Fig. 7  
Comparison of displacements along  $OY$ : a – a solid body,  $\delta_{\max} = -0,0245 \text{ m}$ ; b – links of finite stiffness,  $\delta_{\max} = -0,0224 \text{ m}$

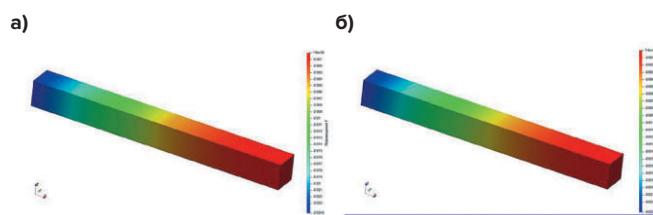


Рис. 8  
Сравнение перемещений по  $OZ$ : а – твердое тело,  $\delta_{\max} = -0,0462 \text{ м}$ ; б – связи конечной жесткости,  $\delta_{\max} = -0,0447 \text{ м}$

Fig. 8  
Comparison of displacements along  $OZ$ : a – a solid body,  $\delta_{\max} = -0,0462 \text{ m}$ ; b – links of finite stiffness,  $\delta_{\max} = -0,0447 \text{ m}$

Вычислим погрешности для перемещений по каждой из осей:

$$OX: \frac{-0,00562 - (-0,00519)}{-0,00562} \cdot 100\% = 7,7\%;$$

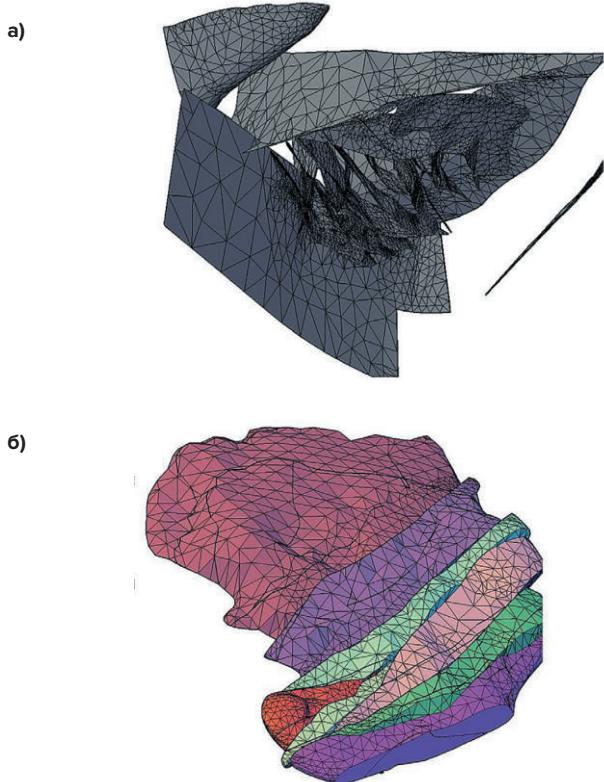
$$OY: \frac{-0,0245 - (-0,0224)}{-0,0245} \cdot 100\% = 8,6\%;$$

$$OZ: \frac{-0,0462 - (-0,0447)}{-0,0462} \cdot 100\% = 3,6\%.$$

Как видно по результатам расчетов, погрешность находится в пределах нормы. Незначительное превышение инженерной погрешности в 5% в данной ситуации сопряжено с накопленной погрешностью от численного интегрирования при вычислении момента инерции и погрешности чисел с плавающей точкой.

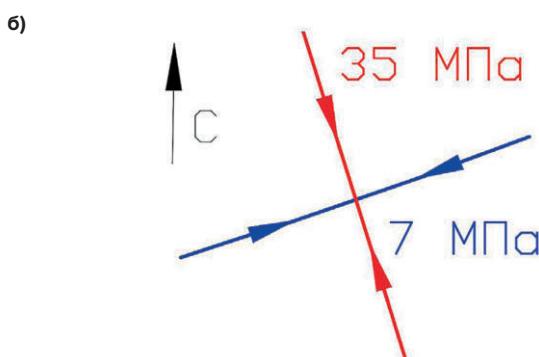
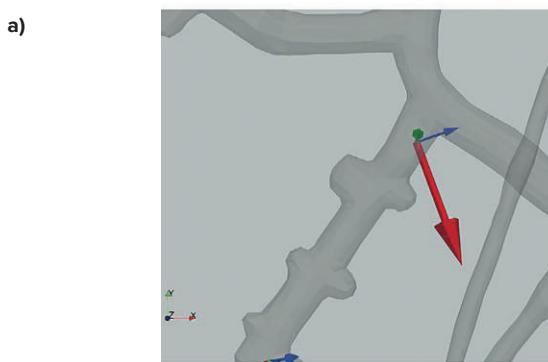
На основании верификационной задачи можно сделать вывод о корректной работе разработанной методики.

С применением указанной методики сформирована и рассчитана глобальная численная модель рудника с большим количеством тектонических нарушений (рис. 9). Так как исходное поле напряжений в руднике гравитационное, не совсем очевидно, что после ведения работ в локальных участках преобладающей компонентой тензора напряжений становится горизонтальная компонента.



**Рис.9**  
Формирование геометрии глобальной численной модели по предложенной методике:  
а – общий вид геометрии тектонических нарушений, представленных в модели, более 40 нарушений;  
б – общий вид геометрии интрузии с учётом тектонических нарушений для воспроизведения корректного напряженно-деформированного состояния

**Fig. 9**  
Formation of the global numerical model geometry using the proposed method:  
a – a general view of the geometry of tectonic faults represented in the model, more than 40 faults;  
b – a general view of the intrusion geometry with account of the faults to reproduce the correct stress-and-strain state



**Рис.10**  
Сравнение локального тензора напряжений:  
а – численная модель;  
б – натурное измерение

**Fig. 10**  
A comparison of the local stress tensor:  
a – a numerical model;  
b – in-situ measurements

Однако при обследовании вертикальной выработки в руднике зафиксированы характерные деформации массива с преобладающей горизонтальной составляющей тензора напряжений. По результатам обследования проведена верификация расчётов в модели, где граничные условия до начала отработки были гравитационными, а после отработки до текущего состояния в модели наблюдается высокая степень сходимости результатов моделирования с фактическим состоянием в руднике (рис. 10) как по ориентации компонент тензора напряжений, так и по их значениям. Таким образом, применение предложенной методики не только позволяет формировать сложные глобальные численные модели с учётом тектонических нарушений, но и позволяет довольно точно описывать процессы перераспределения напряжений в результате ведения добывчих работ с их учётом.

### Заключение

Представлена и обоснована новая методика моделирования тектонических нарушений с использованием связей конечной жёсткости. Этот подход позволяет задавать ослабленные зоны, соответствующие разломам, в неявной форме, что существенно снижает трудоёмкость подготовки расчётных моделей. Вместо явного моделирования геометрии каждого тектонического нарушения предлагается использование специальных связей – пружин с заданной жёсткостью в определённом направлении, которые воспроизводят механическое поведение ослабленных участков массива.

Для практической реализации разработанной методики создана специализированная надстройка к программному комплексу CAEFidesys. Надстройка выполнена в виде внеш-

него программного модуля на языке Python и обеспечивает возможность автоматического добавления связей конечной жёсткости в расчётную сетку. Это делает методику гибкой и удобной в использовании, позволяя адаптировать её к различным инженерным задачам и условиям.

Проведённая верификация разработанного инструмента на ряде тестовых задач показала высокую точность воспроизведения напряжённо-деформированного состояния в присутствии тектонических нарушений. Методика также была успешно опробована в реальных инженерных проектах, что подтвердило её прикладную ценность и работоспособность.

Таким образом, предложенное решение представляет собой эффективный инструмент для численного моделирования тектонических нарушений и может быть использовано в задачах геомеханического анализа при проектировании и эксплуатации горнотехнических и инфраструктурных объектов, расположенных в зонах со значительным количеством тектонических нарушений.

### **Список литературы / References**

1. Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Буслова М.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением. *Записки ГорногоИнститута*. 2023;262:619–627. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15942>(дата обращения: 25.03.2025).  
Protosenya A.G., Belyakov N.A., Bouslova M.A. Modelling of the stress-strain state of block rock mass of ore deposits during development by caving mining systems. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:619–627. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15942>(accessed: 25.03.2025).
2. 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>  
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>
3. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Недра; 1975. 536 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/8568> (дата обращения: 25.03.2025)
4. Treffeisen T., Henk A. Representation of faults in reservoir-scale geomechanical finite element models – A comparison of different modelling approaches. *Journal of Structural Geology*. 2020;131:103931. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.103931>
5. Markou N., Papanastasiou P. 3D geomechanical finite element analysis for a Deepwater faulted reservoir in the eastern Mediterranean. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025;58(1):65–86. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03806-9>
6. Господариков А.П., Зацепин М.А. Математическое моделирование нелинейных краевых задач геомеханики. *Горный журнал*. 2019;(12):16–20.<https://doi.org/10.17580/gzh.2019.12.03>  
Gospodarikov A.P., Zatsepin M.A. Mathematical modeling of boundary problems in geomechanics. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(12):16–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.12.03>
7. Atif M., Raghukanth S.T.G., Manam S.R. Finite-fault simulations for rotations and strains in the near-fault subjected to layered reduced micropolar half-space. *Journal of Seismology*. 2023;27(3):537–572.<https://doi.org/10.1007/s10950-023-10140-0>
8. Гайнанов Ш.Х., Аптуков В.Н., Середин В.В. Математическое моделирование трещиноватости пород в пределах локальных структур. Известия Томского политехнического университета. *Инжениринг георесурсов*. 2024;335(1):184–193. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4541>  
Gaynanov Sh.Kh.1, Aptukov V.N.1, Seredin V.V. Mathematical modeling of rock sfracture with in 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>
9. Khalifeh-Soltani A., Alavi S.A., Ghassemi M.R., Ganjiani M., Derakhshani R. Elucidating fault-related fold mechanics: a 2D finite element analysis of bending, slip, and buckling mechanisms. *Frontiers in Earth Science*. 2023;11:1295898. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1295898>
10. Augarde C.E., Lee S.J., Loukidis D. Numerical modelling of large deformation problems in geotechnical engineering: A state-of-the-art review. *Soils and Foundations*. 2021;61(6):1718–1735. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.08.007>
11. Peikert J., Hampel A., Bagge M. Three-dimensional finite-element modeling of Coulomb stress changes on normal and thrust faults caused by pore fluid pressure changes and postseismic viscoelastic relaxation. *Geosphere*. 2024; 20 (1):105–128. <https://doi.org/10.1130/GES02672.1>
12. Hutka G.A., Cacace M., Hofmann H., Zang A., Wang L., Ji Y. Numerical investigation of the effect of fluid pressurization rate on laboratory-scale injection-induced fault slip. *Scientific Reports*. 2023;13:4437. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30866-8>

13. Novikov A., Behbahani S.S., Voskov D., Hajibeygi H., Jansen J.-D. Benchmarking numerical simulation of induced fault slip with semi-analytical solutions. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024;10:182. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00896-1>
14. Мещанинов С.К. Методы моделирования и управления надежностью функционирования горных выработок. Днепропетровск: Национальный горный университет; 2011. 360 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/21426> (дата обращения: 25.03.2025).
15. Захаров В.Н., Филиппов Ю.А., Аверин А.П., Харченко А.В. Геопространственное моделирование рельефа местности и тектонической нарушенности массива горных пород. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010;(S5):9–13.  
Zakharov V.N., Filippov Yu. A., Averin A.P., Kharchenko A.V. Geospatial modeling of topographic features and tectonic faults of the rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010; (S5):9–13. (InRuss.)
16. Мирошникова Л.К., Мезентьев А.Ю., Семенякина Н.В., Котельникова Е.А. Геодинамически активные структуры западного фланга Талнахской тектономагматической системы. *Горная промышленность*. 2020;(3):105–112. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-105-112>  
Miroshnikova L.K., Mezentsev A.Yu., Semenyakina N.V., Kotelnikova E.M. Geodynamically active structures of western flank of Tanakh orogenic system. *Russian Mining Industry*. 2020;(3):105–112. (InRuss.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-105-112>
17. Клыков П.И., Зверев Г.В., Наговицын А.В., Петренко И.А., Кудряшова Д.А., Мошкин Н.А. Построение 1D геомеханической модели для сложных горно-геологических условий на примере месторождения Южного Каспия. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2024;(6):12–18.  
Klykov P.I., Zverev G.V., Nagovitsin A.V., Petrenko I.A., Kudryashova D.A., Moshkin N.A. Building an 1D geomechanical model for complicated geological conditions using the example of a South Caspian field. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2024;(6):12–18. (InRuss.)
18. Мирошникова Л.К., Мезентьев А.Ю., Кадыралиева Г.А., Перепелкин М.А. Геодинамическое районирование юго-западной части Талнахской тектономагматической системы. *Горная промышленность*. 2021;(6):103–109. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-103-109>  
Miroshnikova L.K., Mezentsev A.Yu., Kadyralieva G.A., Perepelkin M.A. Geodynamic zoning of the southwestern part of the Talnakh Orogenic System. *Russian Mining Industry*. 2021;(6):103–109. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-103-109>

**Информация об авторах**

**Головченко Юрий Юрьевич** – 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

**Лалин Владимир Владимирович** – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>

**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

**Information about the authors**

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

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

**Vladimir V. Lalin** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Politechnik University, Saint Petersburg, Russian Federation; Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>

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

**Article info**

Received: 09.05.2025

Revised: 18.06.2025

Accepted: 21.06.2025

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 09.05.2025

Поступила после рецензирования: 18.06.2025

Принята к публикации: 21.06.2025