

# ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТИ И МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ТРЕЩИНОВАТОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

П. Э. Вербило<sup>1</sup>, М. А. Вильнер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: verbilo\_pe@pers.spmi.ru

**Аннотация:** Рассмотрен метод прогнозирования прочностных и деформационных характеристик трещиноватых горных массивов с применением численного моделирования. Исследована последовательность создания численной геомеханической модели горного массива, где массив моделируется в явном виде по схеме существующей трещиноватости в условиях месторождения апатит-нефелиновых руд, предложены схемы проведения виртуальных испытаний. Целью исследования поведения модели горного массива является определение зависимостей распределения напряжений и деформаций в трещиноватом горном массиве, определение параметров моделей для количественной оценки влияния пространственной ориентации систем трещин на предельную прочность участка массива. Описана методика проведения серии численных экспериментов над трещиноватым массивом горных пород различных габаритов, где среда массива задана дискретно с учетом контактных механических характеристик между блоками горной породы. По результатам виртуальных испытаний получены характеристики снижения прочности массива горных пород при увеличении его размеров – при увеличении области трещиноватого массива горных пород наблюдается снижение значений его механических характеристик до момента формирования репрезентативного элементарного объема.

**Ключевые слова:** трещиноватый горный массив, трещины, численное моделирование, одноосная прочность на сжатие, анизотропия, масштабный эффект, дискретная среда, горная порода, геомеханика.

**Для цитирования:** Вербило П. Э., Вильнер М. А. Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 47–59. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_47.

## Study of the jointed rock mass uniaxial compression strength anisotropy and scale effect

P. E. Verbilo<sup>1</sup>, M. A. Vilner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 199106, Russia

**Abstract:** The method of prediction of strength and deformation characteristics of jointed rock mass using numerical finite-element modeling is considered. The sequence of creation of numerical geomechanical model of rock mass is considered, the rock mass is modeled explicitly by the scheme of existing discontinuities in the considered conditions of apatite-nepheline ores deposit, the schemes of conducting virtual tests are offered. The purpose of study of rock mass

model behavior is to determine stress distribution dependences in jointed rock mass, to determine model parameters for quantitative estimation of influence of spatial orientation of discontinuities systems on ultimate strength of rock sample. A methodology is described for conducting a series of numerical experiments over a jointed rock mass of various dimensions, where the rock mass environment is specified discretely taking into account the contact mechanical characteristics between rock blocks. The characteristics of the decrease in the strength of a rock mass with an increase in its size were obtained based on the results of virtual tests – with an increase in the area of a jointed rock mass there is the decrease in the values of its mechanical characteristics until the formation of a representative elementary volume.

**Key words:** jointed rock mass, discontinuities, numerical modelling, uniaxial compression strength, anisotropy, scale effect, discrete medium, rock sample, geomechanics.

**For citation:** Verbilo P. E., Vilner M. A. Study of the jointed rock mass uniaxial compression strength anisotropy and scale effect. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–2):47–59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_47.

---

## **Введение**

Изучение механических характеристик горного массива с достаточной степенью достоверности является важнейшей задачей при проектировании разработки месторождений полезных ископаемых и строительстве подземных объектов. Горный массив имеет неоднородную анизотропную структуру, геометрические и механические параметры нарушений которых должны быть тщательно изучены.

Для изучения характеристик горного массива существует комплекс методов [1 – 4], применимость каждого из которых необходимо оценивать в конкретной ситуации. Прямые методы исследования, или натурные испытания [5, 6], являются технически сложными в реализации и дорогими. Среди натуральных методов выделяют оконтуривание участка массива, экспериментальные камеры, метод цилиндрических гидравлических пуансонов, испытания непосредственно в горном массиве, а также сейсмоакустические методы. Такой тип исследований позволяет исключить ограниченность размеров образцов, как в лабораторных испытаниях, однако характеризуется сложностью интерпретации результатов из-за геотехнической неопределенности граничных условий [7].

Во многих случаях при проектировании целесообразно применять косвенные методы исследования. Эмпирический подход [9, 10, 11] позволяет достоверно оценить прочностные и деформационные параметры массивов на основании предыдущего опыта и аналогичных месторождений. Применимость эмпирических методов уместна в конкретных горно-геологических условиях, для которых установлены определенные эмпирические показатели и взаимосвязи. В ином случае возможны значительные неточности, что снижает как безопасность ведения работ, так и экономическую эффективность строительства или разработки месторождений. В частности, эмпирические методы не дают возможность оценить анизотропию горного массива [14].

Данную задачу решают аналитические методы [8], позволяющие в тензорном виде учесть анизотропию свойств, однако они слишком сложны для оценки геометрически сложных нарушений, характерных для реальных массивов.

Принципиально иной подход, объединяющий в себе достоинства эмпирических и аналитических методов, представляет собой численное моде-

лирование [12, 13]. Моделирование позволяет представить условия реальных массивов с наименьшей степенью идеализации [14] и учесть наибольшее количество влияющих факторов. Применительно к трещиноватым массивам наиболее достоверные результаты могут быть получены в таких программных комплексах, как PFC, Yade, UDEC, DDA, Simulia Abaqus. В таком случае возможно количественно оценить влияние геометрических параметров нарушений и механических свойств контактов на механизм разрушения массива.

Таким образом, трещиноватый горный массив при изучении механизмов разрушения можно рассматривать как несплошную анизотропную среду с применением методов дискретного моделирования. Такой подход дает возможность получить представление о реальном распределении напряжений и деформаций тензорных компонентов в массиве [15, 16].

В работе проведено исследование поведения нарушенного блочного массива горных пород с учетом возникновения и развития трещин и зон нарушенности. В исследовании рассматривается анизотропия первого порядка, обусловленная упорядоченным залеганием горных пород в виде ряда блоков, разделенных тектоническими разрывами.

#### **Численная геомеханическая модель трещиноватого горного массива**

Исследование осуществлялось с применением комплекса методов, включающего анализ натуральных данных и применение их в численном моделировании. Проведен анализ результатов лабораторных экспериментов образцов горных пород, выполненных специализированными организациями, а также

анализ геологоразведочных материалов рудника «Плато Расвумчорр» (АО «Апатит»). Полученные данные применены при верификации численных моделей трещиноватых массивов, прогнозирующих геомеханические процессы в рамках механики дискретных сред.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе Simulia Abaqus для условий Хибинского массива, для которого выделено несколько сечений с различной геометрической структурой трещиноватости. Задача по виртуальным испытаниям трещиноватого массива горных пород выполнена в плоской постановке. Прочностные параметры блоков породы описываются упругопластической моделью Кулона–Мора, механическое поведение контактов между блоками — нелинейный критерий прочности Бартона. Критерием разрушения блочного массива является реализация сдвиговых деформаций вдоль поверхностей существующих нарушений, при этом образующие горный массив сплошные породные блоки не достигают предельного состояния.

Подготовка модели выполнена на основании анализа натуральных данных, содержащих сведения о механических характеристиках горных пород и контактных параметрах трещин, геометрической структуре горного массива. Дискретное представление массива подразумевает учет множества механических связей, что значительно усложняет расчет задачи.

В рамках исследования горный массив рассматривается как дискретная среда, а численные эксперименты выполняются по схеме заданных деформаций, с передачей деформаций через абсолютно жесткую пластину, перемещающуюся вниз, и фиксацией нижней части модели во всех направле-

ниях. При этом увеличиваются напряжения на контактах между породными блоками, что приводит к развитию смещений блоков вплоть до потери устойчивости. При достижении напряжениями на контактах предельного значения связи между блоками разрушаются, а сами блоки имеют возможность смещаться относительно друг друга.

Для изучения характеристик анизотропии дискретной среды в массиве созданы модели шириной 4 м и высотой 8 м, в которых изменялся угол падения систем трещин с шагом 15 градусов, как показано на рис. 1.

В проведенном исследовании геологического строения и инженерно-геологических условий месторождения «Плато Расвумчорр» изучены физико-механические свойства пород, образующих восточную часть месторождения, на основании данных кернового материала десяти инженерно-геологических скважин. Установлены основные механические характеристики руд и вмещающих пород.

Приняты следующие параметры для апатит-нефелиновых руд:

– плотность  $\rho = 2760 \text{ кг/м}^3$ ; модуль упругости  $E = 50 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,255$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 27^\circ$ ; сцепление  $c = 30 \text{ МПа}$ ;

$\varphi_r$  – остаточный угол внутреннего трения –  $28^\circ$ , остаточное сцепление –  $4,9 \text{ кг/м}^2$ ;

– среднее значение коэффициента структурного ослабления при среднем размере блока  $0,42 \text{ м} - 0,019$ , а при среднем размере  $2,3 \text{ м} - 0,024$  (определен по методу ВНИМИ);

– прочность на сжатие заполнителя трещины –  $20 \text{ МПа}$ , коэффициент шероховатости стенок трещин согласно классификации Бартон –  $18$ .

Исследования показали, что площадь фактического контакта, или зацепления, двух шероховатых поверхностей минимальна, а контактные напряжения возникают только в местах зацепления. Площадь зацепления увеличивается с увеличением нормальной нагрузки на контакт за счет упругой деформации, а затем разрушения неровностей. Такое контактное взаимодействие может быть описано нелинейным критерием прочности Бартон (1), при этом отклонение результатов наблюдается в пределах 2%:

$$\tau_r = \sigma_n \cdot \text{tg}(JRC \cdot \lg \frac{JCS}{\sigma_n} + \varphi_r), \quad (1)$$

где  $JRC$  – коэффициент шероховатости поверхности ослабления;  $JCS$  – проч-

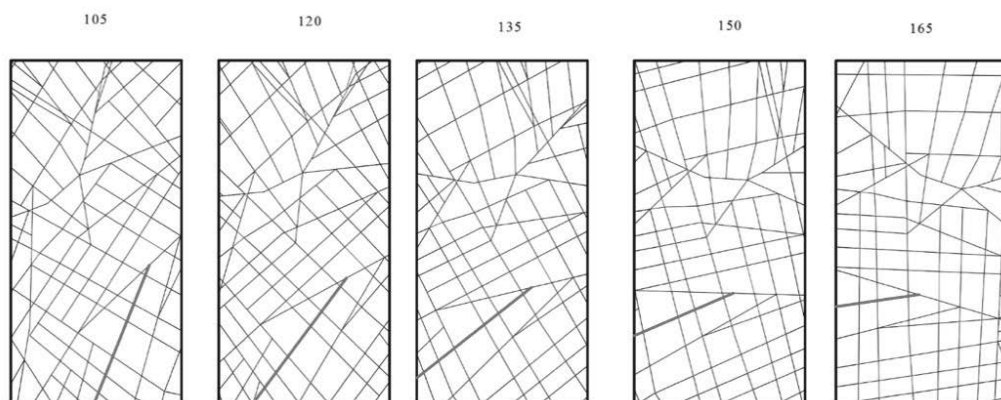


Рис. 1. Образцы массива горных пород для различных углов падения систем трещин  
Fig. 1. Samples of rock mass for different angles of discontinuities system incidence

ность на сжатие заполнителя трещины, МПа;  $\sigma_n$  – нормальные напряжения на контакте трещины, МПа;  $\varphi_r$  – угол остаточного трения, град.

### Результаты и обсуждение

По результатам исследования получены диаграммы напряженно-деформированного состояния трещиноватого горного массива, как пример приведены эпюры напряжений в массиве по мере его деформирования на стадиях 10, 25, 75 и 100% от величины относительных деформаций на стадии до разрушения (рис. 2). Характер распределения напряжений в дискретном массиве существенно отличается от однородной изотропной среды, даже с заданными пониженными деформационными и прочностными свойствами. Блочное строение массива обуславливает анизотропию свойств, поскольку в случае изменения про-

странственной ориентации рассматриваемой системы трещин при прочих равных граничных условиях происходят изменения контактного взаимодействия и положения плоскостей скольжения.

Деформация трещиноватого горного массива сопровождается значительным изменением структуры за счет поступательного смещения по границам контакта. При деформировании наблюдается эффект дилатансии, отчетливее всего проявляющийся на стадии упругой деформации.

Процесс деформации горного массива происходит по пути наименьшего сопротивления с локальными участками концентрации напряжений. Так, основные деформации в трещиноватом массиве происходят вдоль поверхностей ослабления. Диаграммы зависимостей напряжений-деформаций для участков массива показаны на рис. 3.

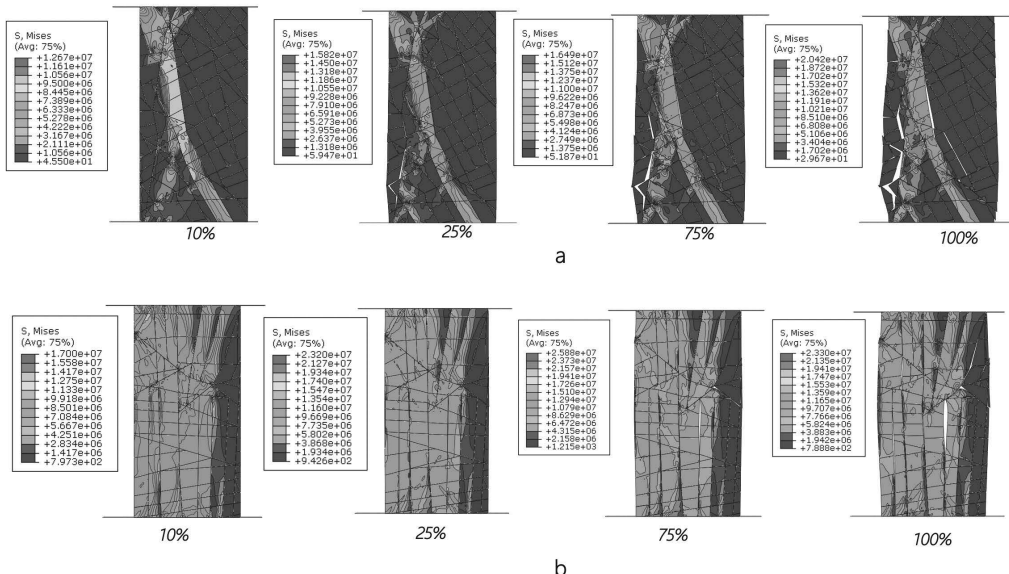


Рис. 2. Диаграммы напряженно-деформированного состояния трещиноватого горного массива при испытании на одноосное сжатие для углов наклона трещиноватости: а – 45°, б – 165°

Fig. 2. Stress-strain diagrams of the jointed rock mass in the uniaxial compression test for discontinuities system angles: а – 45°, б – 165°

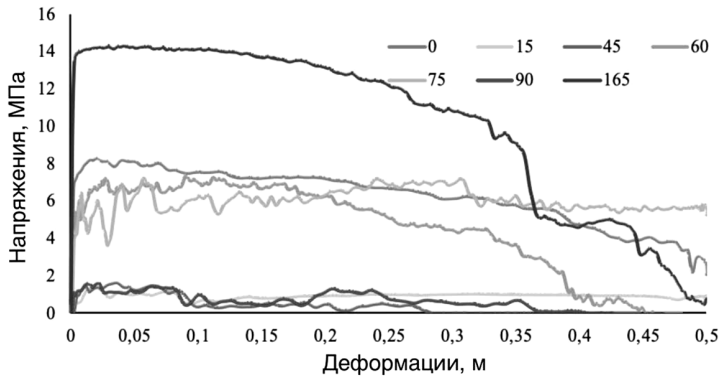


Рис. 3. Диаграммы зависимостей напряжений-деформаций для участков трещиноватого массива породы: 30°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 165°, 180°  
 Fig. 3. Diagrams of stress-strain dependences for jointed rock mass: 30°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 165°, 180°

По данным численного исследования анизотропии прочности при одноосном сжатии трещиноватого горного массива построен график прочности на сжатие участка трещиноватого горного массива высотой 8 м и шириной 4 м при изменении угла падения системы трещин (рис. 4).

Прогнозирование процессов деформации и разрушения трещиноватого горного массива выполнено с учетом фактических геометрических параметров блоков и их механических свойств, а также контактных условий, что позволяет выполнить достоверную

оценку зон концентрации напряжений и развития деформации вдоль трещин. При этом график деформации трещиноватого горного массива в осях «напряжения-относительные деформации» нелинейный и в общем случае может быть идеализированно описан упруго-пластической моделью прочности. Это подразумевает накопление напряжений на участке массива до предельного значения и сдвиг по поверхностям ослабления с потерей несущей способности массива. Такой подход позволяет описать трещиноватый горный массив как дискретную среду с возможностью

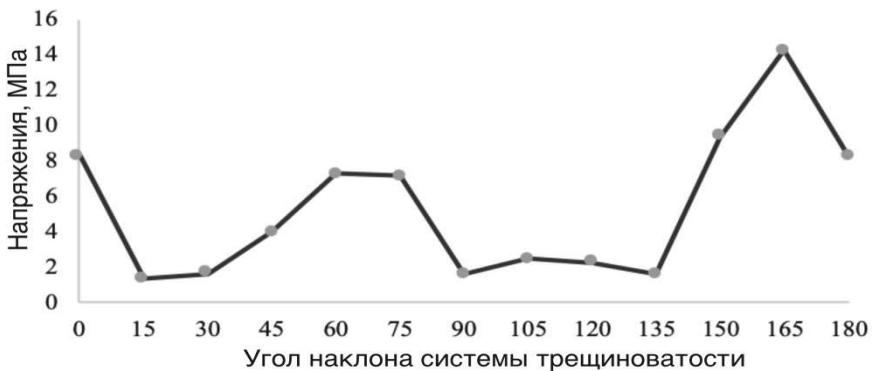


Рис. 4. Прочностная анизотропия трещиноватого горного массива  
 Fig. 4. Strength anisotropy of jointed rock mass

сдвига по поверхностям ослабления и развития нарушений. Вопросы представления массива дискретной средой подробно рассмотрены в работах [15–17] и обобщены в виде модели деформаций в неоднородном твердом теле.

При сравнении результатов численных экспериментов с натурными данными [18] можно сделать вывод, что наблюдаются зависимости прочности массива от угла падения систем трещин, что подтверждает достоверность математического моделирования. На основании результатов численных экспериментов можно утверждать, что достоверность представления горного массива имеет принципиальное значение для получения качественного соответствия результатов моделирования с натурными данными, что подтверждается работой [19]. Достоверность достигается созданием численной гео-

механической модели с учетом инженерно-геологических особенностей горного массива, характеристик структурной нарушенности, выбора соответствующей модели механического поведения и критерия прочности материала [20, 21].

### Масштабный эффект прочности в трещиноватом горном массиве

Исследованиями установлено, что в зависимости от рассматриваемого размера участка горного массива, имеющего определенную геометрическую структуру и находящегося в определенном напряженном состоянии, наблюдается изменение его механических характеристик. Закономерность изменения механических характеристик в зависимости от размеров рассматриваемого участка массива представляет собой масштабный эффект [14].

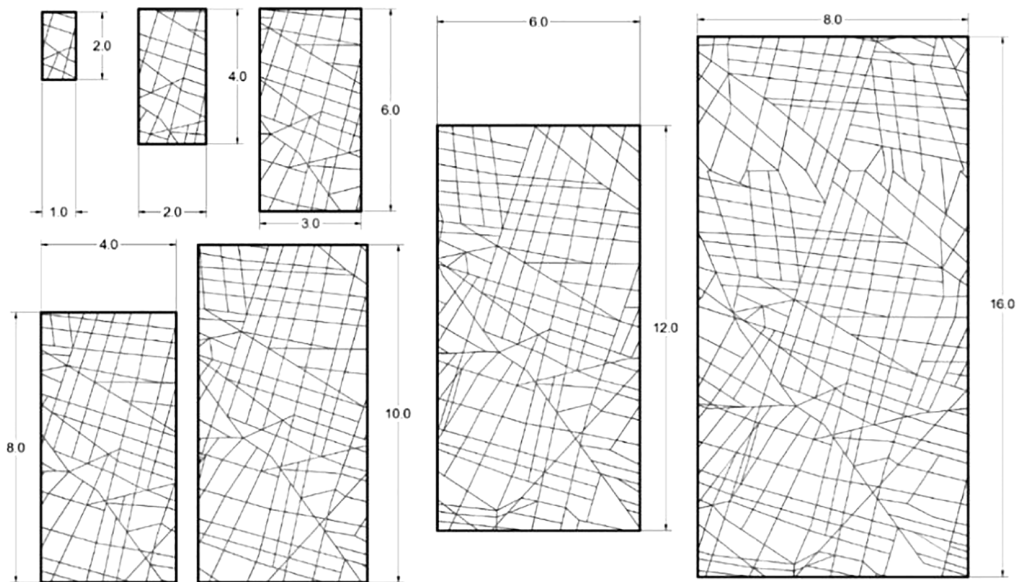


Рис. 5. Модели участков блочного массива с хаотической системой трещин согласно представленной на рис. 1, а, с соотношением сторон 1:2 и размерами 1 × 2 м, 2 × 4 м, 3 × 6 м, 4 × 8 м, 5 × 10 м, 6 × 12 м, 7 × 14 м, 8 × 16 м

Fig. 5. Models of sections of a jointed rock mass with a chaotic system of discontinuities as shown in Fig. 1, a, with sides ratio of 1: 2 and dimensions: 1 × 2 m, 2 × 4 m, 3 × 6 m, 4 × 8 m, 5 × 10 m, 6 × 12 m, 7 × 14 m, 8 × 16 m

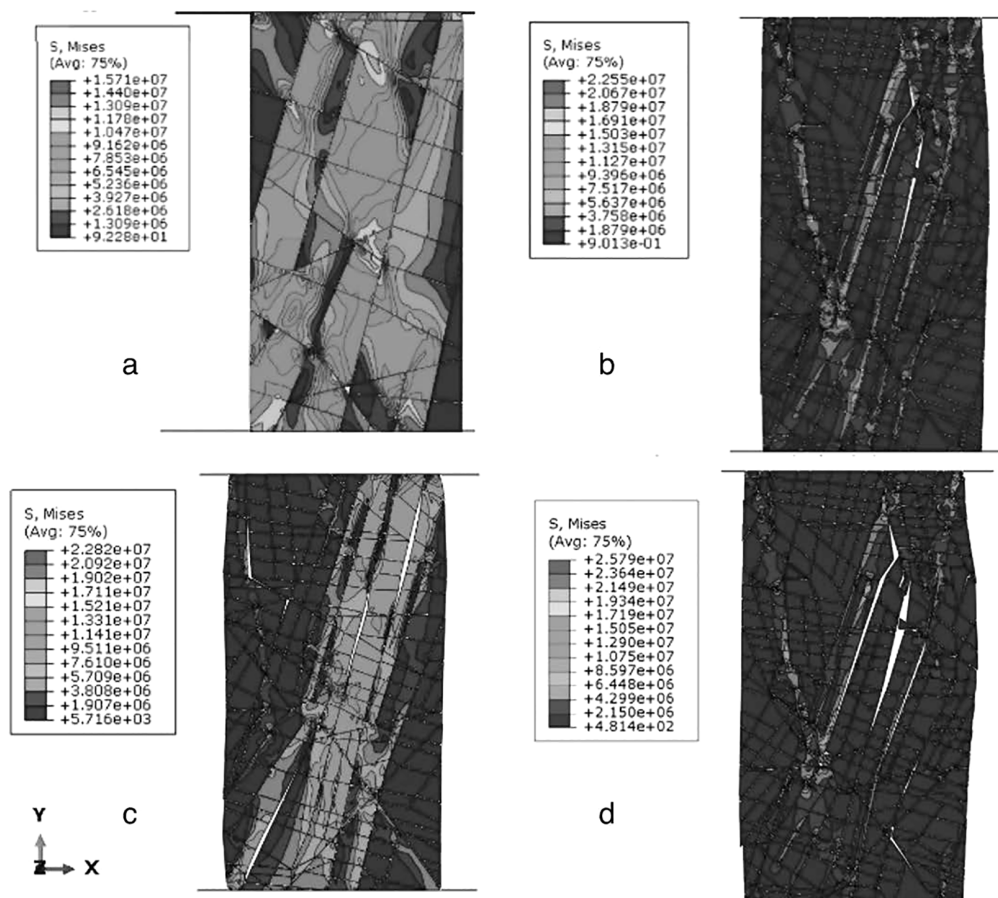


Рис. 6. Предельные состояния участков блочного рудного массива с различными размерами: а –  $2 \times 4$  м, б –  $4 \times 8$  м, в –  $6 \times 12$  м, д –  $8 \times 16$  м

Fig. 6. Limit states of a block ore mass sections with different sizes: a –  $2 \times 4$  m, b –  $4 \times 8$  m, c –  $6 \times 12$  m, d –  $8 \times 16$  m

По мере расширения границ участка число трещин, попадающих в рассматриваемую зону, увеличивается, что количественно определяется соотношением длины рассматриваемого участка к среднему размеру блока. На рис. 5 представлены геометрические модели участков трещиноватых горных пород различных размеров.

В процессе проведения численного эксперимента по схеме заданных деформаций массив деформируется и разрушается, диаграмма напряжений на предельной стадии деформирования представлена

на рис. 6. Графическое представление процесса деформирования показано на графиках зависимостей деформаций от главных напряжений (рис. 7).

Анализ результатов показывает, что по мере увеличения интенсивности трещиноватости, то есть увеличения размеров рассматриваемого участка горного массива, происходит постепенный переход от жесткопластической модели деформирования к упругопластической и далее к упругой модели.

Влияние интенсивности трещиноватости на изменение механических



характеристик участка массива подтверждается результатами численных экспериментов на одноосное сжатие (рис. 8).

Таким образом, в горном массиве существует участок определенных размеров, изменение которых не приведет к значительным изменениям его механи-

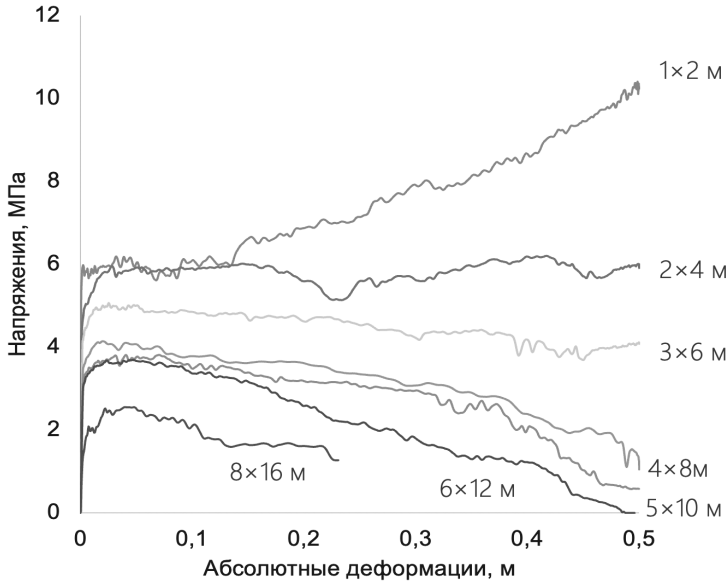


Рис. 7. Графики деформации блочного горного массива по результатам численного моделирования

Fig. 7. Graphs of deformation of a jointed rock mass based on the results of numerical modeling

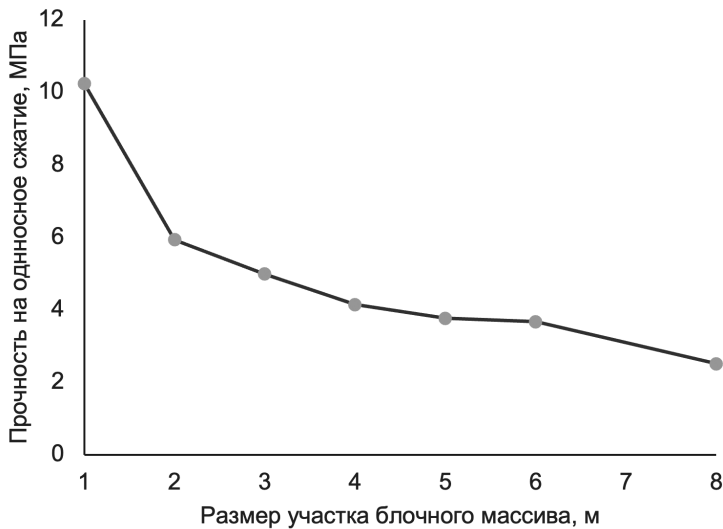


Рис. 8. Масштабный эффект прочности на одноосное сжатие для участка блочного массива

Fig. 8. Scale effect of uniaxial compressive strength for a section of a jointed rock mass

ческих свойств, так называемый репрезентативный элементарный объем. Его определение и оценка прочностных параметров возможны при установлении параметров масштабного эффекта механических характеристик горного массива.

### **Заключение**

Массив горных пород имеет сложное пространственное строение, которое должно быть учтено при проектировании подземных сооружений. Наличие нарушений в приконтурном массиве изменяет характер деформирования. Традиционные аналитические и эмпирические методы геомеханического анализа позволяют учитывать особенности развития геомеханических процессов вокруг подземных сооружений в определенных пределах. Идеализация трещиноватого горного массива делает невозможным учет влияния его строения на закономерности распределения напряжений и деформаций.

Горно-геологическая характеристика массива имеет определяющее значение при описании его поведения, что требует проведения многофакторного геомеханического анализа для оценки геотехнических рисков и определения степени идеализации массива, особенно в сложных условиях отработки. Применение численных методов анализа сложных пространственных структур подземных сооружений позволяет достичь высокой степени достоверности расчетов, однако является не до конца решенным вопросом и требует доработки методологических подходов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Протосеня А. Г., Куранов А. Д.* Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения // Горный журнал. — 2015. — № 1. — С. 17–20. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.03.
2. Yalin Li, Navid Bahrani. Strength and failure mechanism of highly interlocked jointed pillars: Insights from upscaled continuum grain-based models of a jointed rock

Применение численного моделирования при оценке напряженно-деформированного состояния трещиноватого горного массива и задание нарушений в явном виде позволяет качественно и количественно оценить характер деформаций блоков породы в процессе нагружения, оценить количество и размеры нарушений, оценить дилатансию при неупругом деформировании участков горного массива.

Метод, используемый в исследовании, показал достаточную точность при решении задач в пространственной постановке; вычислительная мощность компьютеров позволяет рассчитывать геомеханические задачи без существенного упрощения сложной фактической структуры трещиноватого горного массива.

По результатам исследования необходимо отметить, что анализ прочности участка трещиноватого горного массива с различными соотношениями сторон и интенсивностью трещиноватости проводился для системы трещин с постоянной ориентацией в пространстве, что усложняет возможность универсального описания механических характеристик массива при изменении данных параметров.

### **Вклад авторов**

*Вербило П. Э.* — разработка численной модели, оформление результатов моделирования, написание текста статьи.

*Вильнер М. А.* — постановка задачи исследования, редакция текстового и графического материала статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

mass analogue // Computers and Geotechnics. 2021, vol. 137. 104278. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104278.

3. *Baqautdinov I. I., Belyakov N. A., Kuranov A. D., Streshnev A. A.* The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite-nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, pp. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/20185601019.

4. *Тюпин В. Н., Хаустов В. В.* Зависимость геомеханического состояния трещиноватого массива от интервала замедления в зоне сейсмического действия массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2. — С. 45–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-45-54.

5. *Yingjie Xia, Chuanqing Zhang, Hui Zhou, Jing Hou, Guoshao Su, Yang Gao, Ning Liu, Hemant Kumar Singh.* Mechanical behavior of structurally reconstructed irregular columnar jointed rock mass using 3D printing // Engineering Geology. 2020, vol. 268. 105509. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105509.

6. *Qing-Xiang Meng, Huan-Ling Wang, Wei-Ya Xu, Yu-Long Chen.* Numerical homogenization study on the effects of columnar jointed structure on the mechanical properties of rock mass // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, vol. 124. 104127. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104127.

7. *Раимжанов Б. Р., Хасанов А. Р.* Оценка структурной нарушенности массива горных пород по рейтинговым классификациям для рудников Зармитанской золоторудной зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 115–127. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-115-127.

8. *Sayedaliroza Fereshkenejad, Jae-Joon Song.* Applicability of powder-based 3D printing technology in shear behavior analysis of rock mass containing non-persistent joints // Journal of Structural Geology. 2021, vol. 143. 104251. DOI: 10.1016/j.jsg.2020.104251.

9. *Jing L., Min K. B., Baghbanan A.* Stress and scale-dependency of the hydro-mechanical properties of fractured rock // Rock mechanics new research. 2009, pp. 109–165.

10. *Jing L.* A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003, vol. 40, no. 3, pp. 283–353. DOI: 10.1016/S1365-1609(03)00013-3.

11. *Hoek E., Brown E. T.* Practical estimates of rock mass strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997, vol. 34, no. 8, pp. 1165–1186. DOI:10.1016/S1365-1609(97)80069-X.

12. *Tianhong Yang, Peitao Wang, Tao Xu, Qinglei Yu, Penghai Zhang, Wenhao Shi, Gaojian Hu.* Anisotropic characteristics of jointed rock mass: A case study at Shirengou iron ore mine in China // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015, vol. 48, pp. 129–139. DOI: 10.1016/j.tust.2015.03.005.

13. *Shuangjian Niu, Hongwen Jing, Kun Hu, Dafang Yang.* Numerical investigation on the sensitivity of jointed rock mass strength to various factors // Mining Science and Technology. 2010, vol. 20, no. 4, pp. 530–534. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60238-6.

14. *Протосеня А. Г., Вербилко П. Э.* Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива // Записки горного института. — 2017. — № 223. — С. 51–57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51.

15. *Subash Bastola, Ming Cai.* Investigation of mechanical properties of jointed granite under compression using lattice-spring-based synthetic rock mass modeling approach // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences/ 2020, vol. 126. 104191. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104191.


16. *Hang Lin, Shijie Xie, Rui Yong, Yifan Chen, Shigui Du.* An empirical statistical constitutive relationship for rock joint shearing considering scale effect // Comptes Rendus Mécanique. 2019, vol. 347, iss. 8, pp. 561–575. DOI: 10.1016/j.crme.2019.08.001.

17. *Jiayi Shen, Zheng Shu, Ming Cai, Shigui Du.* A shear strength model for anisotropic blocky rock masses with persistent joints // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 134. 104430. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104430.

18. Рац М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватой горной породы. — М.: Недра, 1970. — 164 с.

19. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornikthis. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109–122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.

20. Адигамов А. Э., Юденков А. В. Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 8. — С. 93–103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_93.

21. Xu-Xu Yang, Hong-Wen Jing, Chun-An Tang, Sheng-Qi Yang. Effect of parallel joint interaction on mechanical behavior of jointed rock mass models // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017, vol. 92, pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.12.010. 

## REFERENCES

1. Protosenya A. G., Kuranov A. D. Procedure of rock mass stress-strain state forecasting in hybrid mining of the Koashvin deposit. *Gornyi Zhurnal*, 2015, vol. 1, pp. 17–20. [In Russ]. DOI:10.17580/gzh.2015.01.03.

2. Yalin Li, Navid Bahrani. Strength and failure mechanism of highly interlocked jointed pillars: Insights from upscaled continuum grain-based models of a jointed rock mass analogue. *Computers and Geotechnics*. 2021, vol. 137. 104278. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104278.

3. Bagautdinov I. I., Belyakov N. A., Kuranov A. D., Streshnev A. A. The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite-nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 56, pp. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/20185601019.

4. Tyupin V. N., Khaustov V. V. Dependence of the geomechanical state of a fractured massif on the interval of deceleration in the zone of seismic action of mass explosions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, vol. 2, pp. 45–54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-45-54.

5. Yingjie Xia, Chuanqing Zhang, Hui Zhou, Jing Hou, Guoshao Su, Yang Gao, Ning Liu, Hemant Kumar Singh. Mechanical behavior of structurally reconstructed irregular columnar jointed rock mass using 3D printing. *Engineering Geology*. 2020, vol. 268. 105509. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105509.

6. Qing-Xiang Meng, Huan-Ling Wang, Wei-Ya Xu, Yu-Long Chen. Numerical homogenization study on the effects of columnar jointed structure on the mechanical properties of rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 124. 104127. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104127.

7. Raimzhanov B. R., Khasanov A. R. Estimation of structural disturbance of a rock mass according to rating classifications for the mines of the Zarmitan gold ore zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, vol. 5, pp. 115–127. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-115-127.

8. Sayedalireza Fereshtenejad, Jae-Joon Song. Applicability of powder-based 3D printing technology in shear behavior analysis of rock mass containing non-persistent joints. *Journal of Structural Geology*. 2021, vol. 143. 104251. DOI: 10.1016/j.jsg.2020.104251.

9. Jing L., Min K. B., Baghbanan A. Stress and scale-dependency of the hydro-mechanical properties of fractured rock. *Rock mechanics new research*. 2009, pp. 109–165.

10. Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003, vol. 40, no. 3, pp. 283–353. DOI: 10.1016/S1365-1609(03)00013-3.

11. Hoek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997, vol. 34, no. 8, pp. 1165–1186. DOI:10.1016/S1365-1609(97)80069-X.

12. Tianhong Yang, Peitao Wang, Tao Xu, Qinglei Yu, Penghai Zhang, Wenhao Shi, Gaojian Hu. Anisotropic characteristics of jointed rock mass: A case study at Shirengou

iron ore mine in China. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 48, pp. 129–139. DOI: 10.1016/j.tust.2015.03.005.

13. Shuangjian Niu, Hongwen Jing, Kun Hu, Dafang Yang. Numerical investigation on the sensitivity of jointed rock mass strength to various factors. *MIAB. Mining Science and Technology*. 2010, vol. 20, no. 4, pp. 530–534. DOI: 10.1016/S1674–5264(09)60238–6.

14. Protosyena A. G., Verbilo P. E. Research of compression strength of fissured rock mass. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 223, pp. 51–57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51.

15. Subash Bastola, Ming Cai. Investigation of mechanical properties of jointed granite under compression using lattice-spring-based synthetic rock mass modeling approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 126. 104191. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104191.

16. Hang Lin, Shijie Xie, Rui Yong, Yifan Chen, Shigui Du. An empirical statistical constitutive relationship for rock joint shearing considering scale effect. *Comptes Rendus Mécanique*. 2019, vol. 347, iss. 8, pp. 561–575. DOI: 10.1016/j.crme.2019.08.001.

17. Jiayi Shen, Zheng Shu, Ming Cai, Shigui Du. A shear strength model for anisotropic blocky rock masses with persistent joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 134. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104430.

18. Rats M. V. Discontinuities and rock sample properties. Moscow, “Nedra”, 1970, 164 p. [In Russ]

19. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornikthis*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109–122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.

20. Adigamov A. E., Yudenkov A. V. Stress–strain behavior model of disturbed rock mass with regard to anisotropy and discontinuities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, vol. 8, pp. 93–103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_93.

21. Xu-Xu Yang, Hong-Wen Jing, Chun-An Tang, Sheng-Qi Yang. Effect of parallel joint interaction on mechanical behavior of jointed rock mass models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017, vol. 92, pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.12.010.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Вербило Павел Эдуардович* – канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6776-5866>, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-ая В. О., дом 2, e-mail: [verbilo\\_pe@pers.spmi.ru](mailto:verbilo_pe@pers.spmi.ru);

*Вильнер Мария Александровна* – аспирант, <https://orcid.org/0000-0002-0424-100X>, Россия, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-ая В. О., дом 2, e-mail: [mary.vilner@gmail.com](mailto:mary.vilner@gmail.com).

**Для контактов:** *Вербило Павел Эдуардович*, e-mail: [verbilo\\_pe@pers.spmi.ru](mailto:verbilo_pe@pers.spmi.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Verbilo P. E.*, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, <https://orcid.org/0000-0001-6776-5866>, Russia, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21-ya V. O., 2, e-mail: [verbilo\\_pe@pers.spmi.ru](mailto:verbilo_pe@pers.spmi.ru);

*Vilner M. A.*, postgraduate student, <https://orcid.org/0000-0002-0424-100X>, Russia, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, line 21 V. O., 2, e-mail: [mary.vilner@gmail.com](mailto:mary.vilner@gmail.com).

**For contact:** *Verbilo Pavel Eduardovich*, e-mail: [verbilo\\_pe@pers.spmi.ru](mailto:verbilo_pe@pers.spmi.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 13.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 13.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.