

# Влияние даек в массиве горных пород на устойчивость горной выработки в условиях действия гравитационно-тектонического поля напряжений

Антон Дмитриевич КУРАНОВ<sup>1\*</sup>

Полина Вячеславовна БАСАЛАЕВА<sup>2\*\*</sup>

Вячеслав Сергеевич ОНУПРИЕНКО<sup>3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> АО «Гипроцветмет»

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Мурманская область, Россия

## Аннотация

**Цель работы** – анализ влияния сложного литологического строения на устойчивость горизонтальных горных выработок в условиях действия гравитационно-тектонического поля напряжений.

**Актуальность работы.** Необходимость учета сложного геологического строения – один из важнейших факторов, влияющих на устойчивость породных обнажений. Под этим подразумевается литологическое строение и наличие литологических неоднородностей. Разность физико-механических, в частности деформационных, свойств литологических разностей и вмещающих пород может привести к неблагоприятной ситуации проявления горного давления при проходке и эксплуатации выработки.

**Методы исследования.** В данной работе изучение поведения массива при наличии литологических неоднородностей с разными физико-механическими свойствами производится на пространственных численных моделях с помощью программного обеспечения Simulia Abaqus. На основании геологических данных с помощью рейтинговых методик произведен переход от физико-механических свойств образца к свойствам массива. Приведены исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива с учетом дайки, а также при идеализации массива без ее учета.

**Результаты работы и область их применения.** В работе приведен обзор формирования литологических неоднородностей, а также литологии как фактора, влияющего на устойчивость горных выработок. Кроме того, были построены и проанализированы численные модели с различными физико-механическими свойствами даек, а также для анализа влияния литологических разностей на устойчивость выработок принят фактический участок проходки выработки, пересекающий дайку мончикитовых пород.

**Выводы.** При упрощении и идеализации массива сплошной средой происходят упущения в напряженно-деформированном состоянии массива. Требуется разработка подробной методики по учету литологических неоднородностей.

**Ключевые слова:** устойчивость горных выработок, литологическое строение, напряженно-деформированное состояние, апатитонелефиновое месторождение, численное моделирование.

## Введение

Обеспечение устойчивости породных обнажений является одним из основных требований, предъявляемых при строительстве и эксплуатации подземных сооружений. Потери устойчивости породных обнажений приводят к снижению эффективной проходки выработок, а также к увеличению затрат на крепежные материалы. Кроме того, потеря устойчивости горных выработок приводит к значительной части несчастных случаев на производстве. Развитие представлений о формировании вокруг выработок зон различного напряженно-деформированного состояния позволяет свести задачи прогнозирования состояния выработок на стадии проектирования к расчету устойчивости пород на контуре выработки и вблизи него.

На устойчивость горных выработок влияет большое количество факторов: напряженно-деформированное состояние массива, трещиноватость, прочностные и де-

формационные свойства пород, геометрические параметры выработок, тектоническое и геологическое строение массива. Исследованию влияния данных факторов посвящено большое количество исследований, однако большой интерес представляет изучение собственно сложного геологического строения на устойчивость породных обнажений. Результаты изучения изменения напряженно-деформированного состояния вблизи литологических разностей приведены в работах [1–5].

Для оценки устойчивости горных выработок массив нередко представляется как изотропная сплошная среда, однако это не всегда является объективным, так как массив горных пород зачастую является анизотропным [6, 7]. Такое идеализированное представление может привести к значительным ошибкам при определении напряженного состояния массива горных пород и оценке устойчивости

✉ Kuranov\_AD@pers.spmi.ru

\*\*Basalaeva\_p@pers.spmi.ru

\*\*\*VOnuprienko@phosago.ru

горной выработки. Одним из вариантов учета нарушения массива является задание различных свойств по направлениям [8], однако наиболее достоверным способом можно считать учет нарушений в явном виде, в том числе и нарушений изотропности массива в условиях сложного геологического его строения.

Однако степень изученности данного вопроса достаточно низкая, в частности, не установлены зависимости изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива горизонтальных выработок вблизи даек при преобладании тектонической составляющей, хотя наличие даек зачастую определяет параметры поля напряжений на локальном уровне. Такие условия наблюдаются, в частности, на рудниках АО «Апатит» [9], одной из крупнейших мировых компаний, разрабатывающих апатитонефелиновые месторождения.

Подземная разработка полезных ископаемых сопровождается непрерывным процессом изменения напряженно-деформированного состояния горных пород, что приводит к деформациям на контуре горных выработок и может привести к потере устойчивости приконтурного массива горных выработок. В целом это явление можно описать как внезапное и неконтролируемое падение пород на контуре выработки непосредственно в выработанное пространство. В условиях рудников АО «Апатит» преимущественной формой потери устойчивости является хрупкое разрушение пород на контуре [10]; наличие зон концентрации напряжений в виде пересечения выработки с дайкой может повысить вероятность хрупкого разрушения участка массива.

Таким образом, основной задачей исследования является установление особенностей геологического строения массива, оказывающего значительное влияние на устойчивость породных обнажений и возможность образования зон хрупкого разрушения.

**Характеристика апатитонефелиновых месторождений Хибин.** Хибинские месторождения апатитонефелиновых руд представляют собой высоконапряженный скальный массив, опасный по проявлениям горного давления в виде стреляний, микроударов, горных ударов, а также горно-тектонических ударов (техногенных землетрясений). Это означает, что массив горных пород обладает большой прочностью и жесткостью, а напряжения, накопленные в нем, достаточны для разрушения в динамической форме при определенных условиях. Критическими по удароопасности для месторождений АО «Апатит» являются глубины 200–300 м [11].

Согласно «Указаниям по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (apatитонефелиновые месторождения, разрабатываемые КФ АО «Апатит» подземным способом: Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый цирк, Плато Расвумчорр)», критерием удароопасности «является превышение расчетными величинами максимальной компоненты главных напряжений 0,5 от предела прочности используемых пород на одноосное сжатие ( $\sigma_{\max} \geq 0,5 \sigma_c$ ). «Указания...» также регламентируют применение ряда инструментальных методов для оценки состояния приконтурной части, для каждого из которых также существует критерий отнесения участка к опасному или неопасному по

горным ударам. С учетом прогноза региональной удароопасности по результатам непрерывного контроля сейсмичности осуществляется комплексный подход к прогнозу удароопасности по факторам сейсмичности и прогноза напряженного состояния массива.

Такие же данные, приведенные в [12], указывает на то, что в используемых региональных прогнозах удароопасности критические напряжения принимаются в диапазоне  $\sigma_1 = 0,5-1,2 \sigma_c$ . Критерием возможности возникновения динамических проявлений горного давления является превышение расчетными величинами максимальной компоненты главных напряжений 0,5 от предела прочности пород на одноосное сжатие ( $\sigma_1 \geq 0,5 \sigma_c$ ).

На потерю устойчивости выработок влияет множество факторов [13–15], но чаще всего причиной потери устойчивости является не один, а комбинация этих факторов. Можно говорить о трех группах факторов – параметры поля напряжений, влияние очистных и проходческих работ, параметры массива горных пород.

На прямолинейных участках выработок наиболее частой причиной является действие поля тектонических напряжений [16]. Для Хибинского массива характерно превышение горизонтальными компонентами напряжений вертикальных, что приводит к нарушению контура выработок и зачастую к хрупкому разрушению.

Очистные работы могут приводить к увеличению концентрации в 4–5 раз относительно естественного поля напряжений.

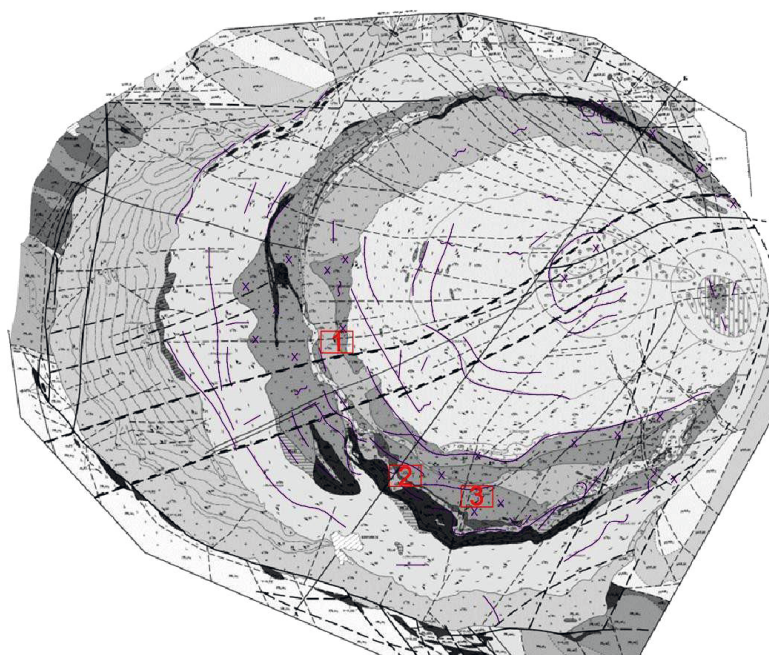
Третьим фактором является строение массива, к нему можно отнести трещиноватость зоны шпреуштейнизации, геологическое и тектоническое строение в целом. Трещиноватые и окисленные породы являются разгруженными от тектонических напряжений, однако в их приконтактных зонах формируется концентрация напряжений. Что касается геологического строения, оно имеет в своем составе различные дайки и включения, которые имеют различное влияние на устойчивость горных выработок. Это будет рассмотрено подробнее далее.

**Геологическое строение.** Литологические разности могут иметь различные формы, и их параметры – геометрические, залегание, физико-механические свойства – меняются в широких пределах [17].

Следует отметить, что на сегодняшний день на рудниках АО «Апатит» принята весьма подробная методика классификации массива по устойчивости и выбору крепи (согласно «Указаниям...»), однако даже с учетом длительной ее апробации и уточнений существуют ситуации, при которых категория устойчивости определяется субъективно, т. е. понижается в зависимости от осложняющих факторов, в том числе и сложного литологического строения.

Несмотря на многолетние работы по изучению строения массива [18–23], необходима их систематизация и дальнейшее накопление для математической обработки большого массива данных для учета данного фактора при определении параметров устойчивости выработок на рудниках АО «Апатит».

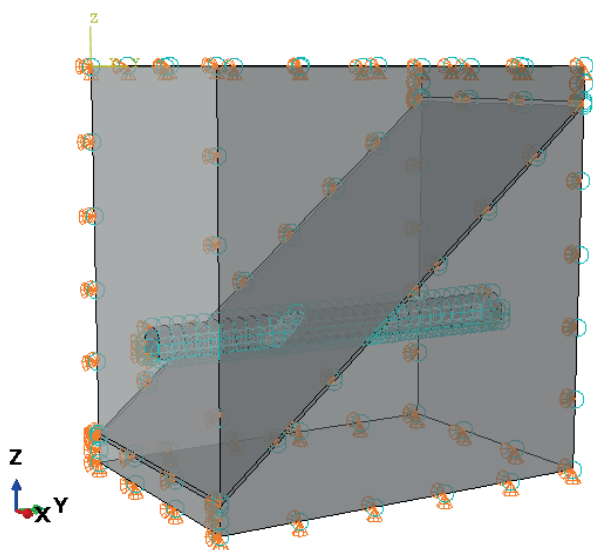
На сегодняшний день на территории Хибинского массива изучено строение более 250 даек. Они представлены породами различных физико-механических свойств и характера разрушения. Основные из них имеют мощность от несколь-



**Рисунок 1. Геологическая схема Хибинского массива с учетом даек [16]. Месторождения: 1 – Кукисвумчорр; 2 – Юкспор; 3 – Расвумчорр. Фиолетовый контур – дайки различных конфигураций**  
**Figure 1. Geological map of the Khibinsky rock mass including dikes [16]. Fields: 1 – Kukisvumchorr; 2 – Yukspor; 3 – Rasvumchorr. Purple outline – dikes of various configurations**

**Таблица 1. Физико-механические свойства, принятые для моделирования (составлено авторами)**  
**Table 1. Physical and mechanical properties taken for modeling (compiled by the authors)**

Литологическая разность	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа	Удельный вес, т/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа
Вмещающие породы	0,33	10,0	0,027	120
Дайка 1	0,33	50,0	0,022	120
Дайка 2	0,33	0,5	0,022	120



**Рисунок 2. Расчетная схема (составлено авторами)**  
**Figure 2. Calculation scheme (compiled by the authors)**

Влияние литологического фактора на образование зон концентрации напряжений во вмещающих породах вокруг горизонтальных выработок. Для оценки влияния литологического фактора были разработаны пространственные численные модели, которые позволяют определить влияние неоднородных прослоек (даек) на напряженно-деформированное состояние на контуре выработки, а затем оценить устойчивость породного обнажения для последующего принятия технологических решений. Для геомеханической интерпретации результатов моделирования рассмотрена выработка на глубине 300 м в условиях апатитонефелиновых месторождений (рис. 2).

Для сравнения влияния дайки на напряженно-деформированное состояние в окрестности выработки при ее приближении к нарушению рассматриваются два типа моделей:

- при наличии дайки с более высоким модулем упругости в сравнении с массивом;
- при наличии дайки с меньшим модулем упругости в сравнении с массивом.

Свойства массива и дайки приняты усредненными на основании обработки данных о физико-механических свойствах массивов апатитонефелиновых месторождений и сведены в табл. 1.

ких сантиметров на глубоких горизонтах до нескольких метров на верхних, имеют крутое падение. Свойства даек варьируются в зависимости от условий их формирования.

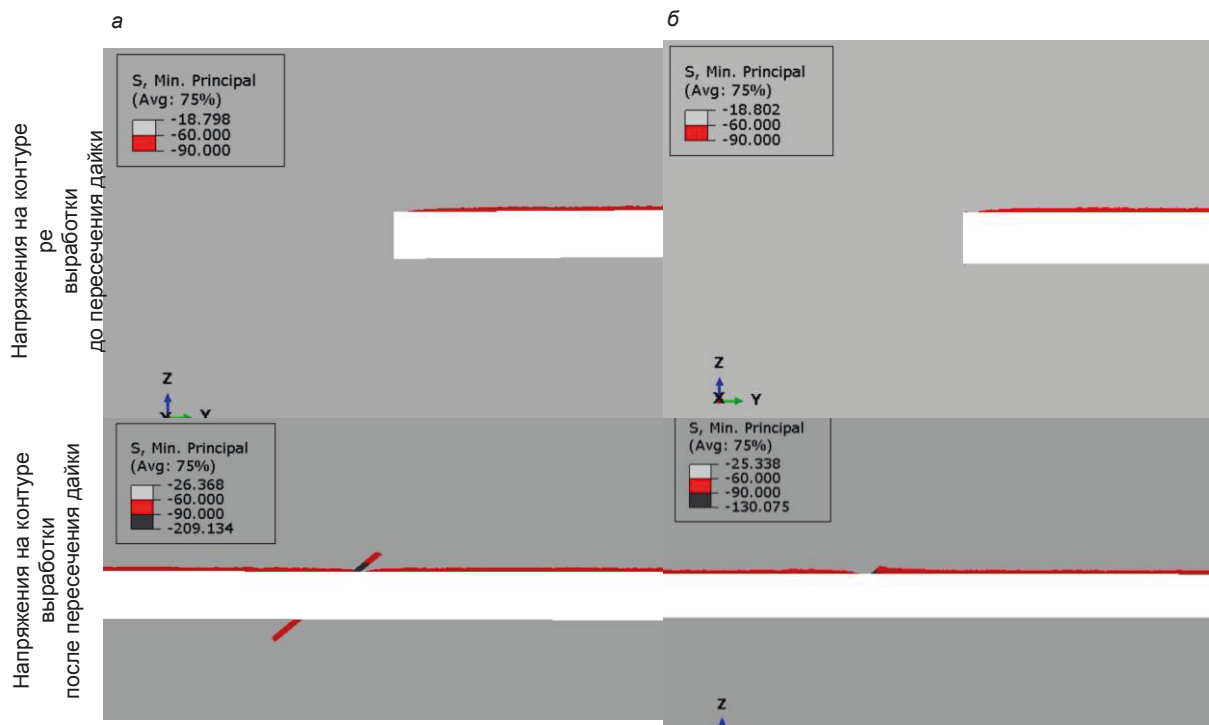


Рисунок 3. Эпюра распределения напряжений в пределах дайки (составлено авторами)  
Figure 3. Plot of stress distribution within a dike (compiled by the authors)

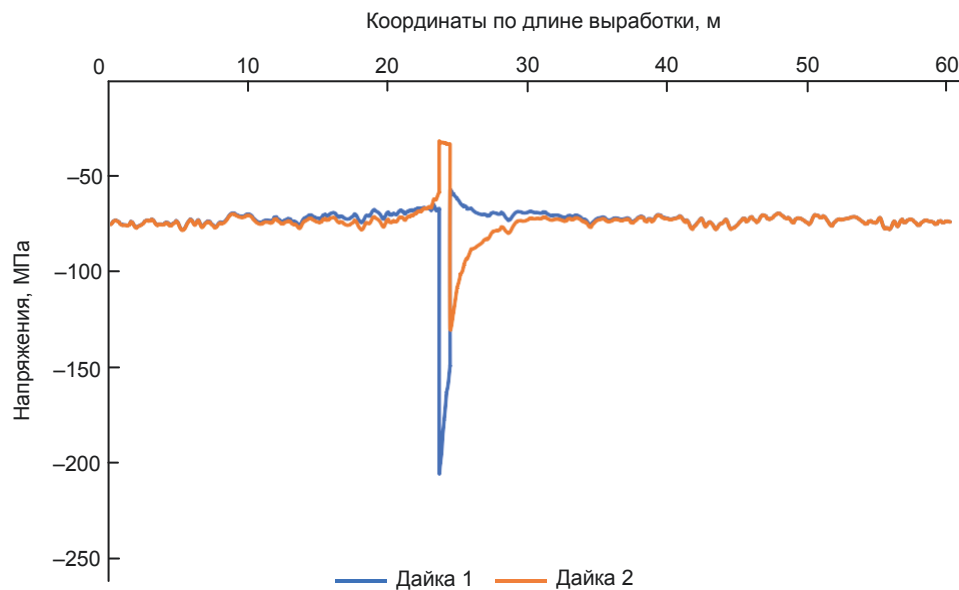


Рисунок 4. График изменения напряженно-деформированного состояния пород на контуре горной выработки при наличии литологических неоднородностей с повышенными и пониженными деформационными свойствами (составлено авторами)  
Figure 4. Graph of changes in the stress-strain state of rocks on the contour of a mine working in the presence of lithological heterogeneities with increased and decreased deformation properties (compiled by the authors)

На рис. 3 показан характер распределения напряжений при приближении выработки к дайке и после ее пересечения. Красным показаны зоны, в которых величины напряжений находятся в пределах  $0,5 \sigma_c \leq \sigma \leq 0,7 \sigma_c$ , черным –  $\sigma > 0,7 \sigma_c$ .

Дайка является зоной концентрации напряжений (рис. 3, а). Ее влияние при подходе выработки может привести к проявлению горного давления в динамической форме, в то время как во втором случае (рис. 3, б) она яв-

ляется зоной разгрузки массива. Это же подтверждается на графике (рис. 4).

Сравнение характера распределения напряжений показывает, что физико-механические свойства даек влияют на распределение максимальных напряжений на контуре выработки. В первом случае максимальные концентрации ( $\sigma = 209$  МПа) располагаются в кровле выработки, в зоне расположения дайки. Во втором – также располага-



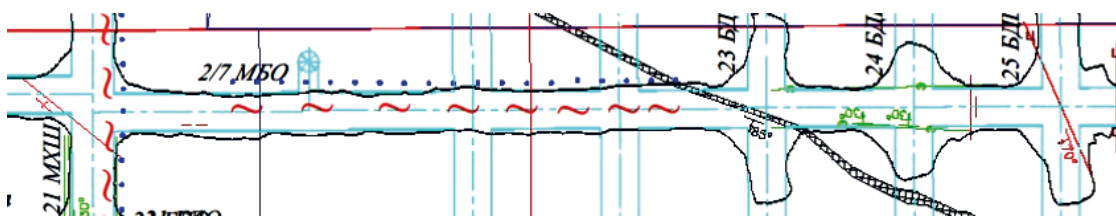


Рисунок 5. Участок плана горных выработок  
Figure 5. Section of the mine working plan

Таблица 2. Усредненные физико-механические свойства в образцах (составлено авторами)  
Table 2. Average physical and mechanical properties in samples (compiled by the authors)

Прочность на одноосное сжатие, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
	<i>Мончикит</i>	
312	76	0,27
	<i>Руда</i>	
120	63	0,33

Таблица 3. Классификация массива горных пород по З. Бенявскому (составлено авторами)  
Table 3. Classification of the rock mass according to Z. Benyavsky (compiled by the authors)

Рейтинг RMR	Класс	Описание	Степень устойчивости
100–81	I	Очень хороший	Весьма устойчивый
80–61	II	Хороший	Устойчивый
60–41	III	Добротный	Средней устойчивости
40–21	IV	Плохой	Неустойчивый
< 20	V	Очень плохой	Весьма неустойчивый

Таблица 4. Расчетные физико-механические свойства массива горных пород (составлено авторами)  
Table 4. Estimated physical and mechanical properties of the rock mass (compiled by the authors)

Прочность на одноосное сжатие, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
	<i>Мончикит</i>	
312	21,8	0,27
	<i>Руда</i>	
120	10	0,33

ются в кровле, однако максимальные напряжения ( $\sigma = 130$  МПа) затрагивает меньшую зону влияния и балансирует с зоной разгрузки, приближенной к фоновым напряжениям в массиве (серый цвет). Исследования свидетельствуют, что при более высоком модуле упругости заполнителя литологических разностей, возникает опасность хрупкого разрушения и потери устойчивости выработки, в то время как при меньшем модуле упругости в массиве происходит перераспределение напряжений таким образом, что появится зона разгрузки массива.

**Анализ события, произошедшего на Кировском руднике.** В целях обеспечения безопасности ведения горных работ оценка устойчивости горных пород является актуальной задачей. Для анализа влияния литологических разностей на устойчивость выработок принят

фактический участок проходки выработки, пересекающий дайку мончикитовых пород шириной 1,5 м, имеющую угол падения 85°.

Далее на основе RMR производится переход от свойств пород в образце к свойствам массива.

Фактические свойства массива для целей моделирования определяются расчетным путем. Модуль упругости с учетом структурного ослабления по формуле Бенявского [24]:

$$E_m = E \exp\left(\frac{RMR - 100}{36}\right),$$

где  $E$  – модуль общей деформации пород по результатам испытаний.

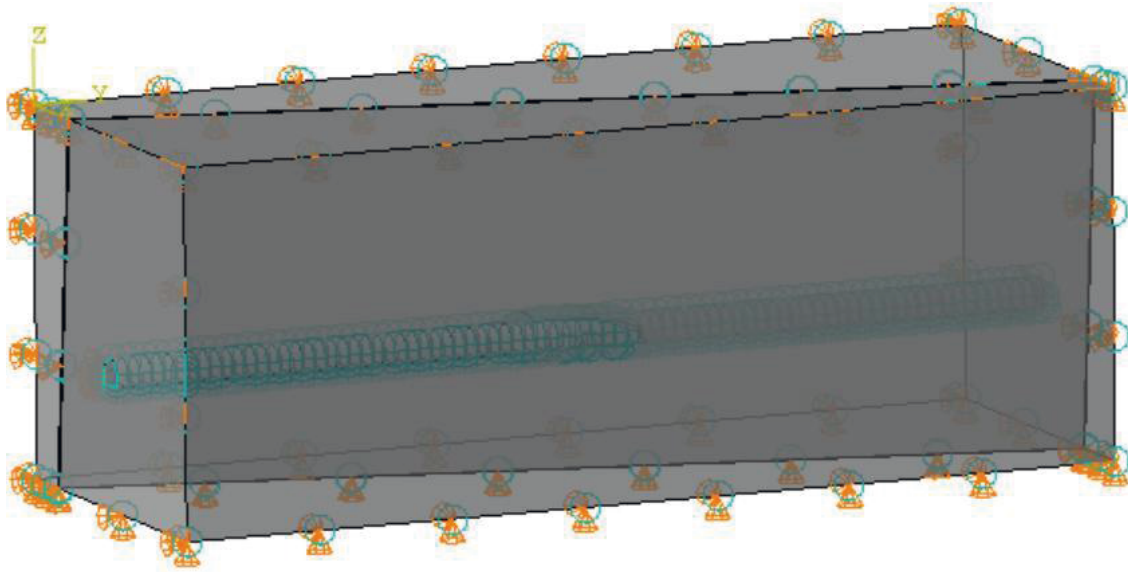


Рисунок 6. Геометрия конечно-элементной модели (составлено авторами)  
Figure 6. Geometry of the finite element model (compiled by the authors)

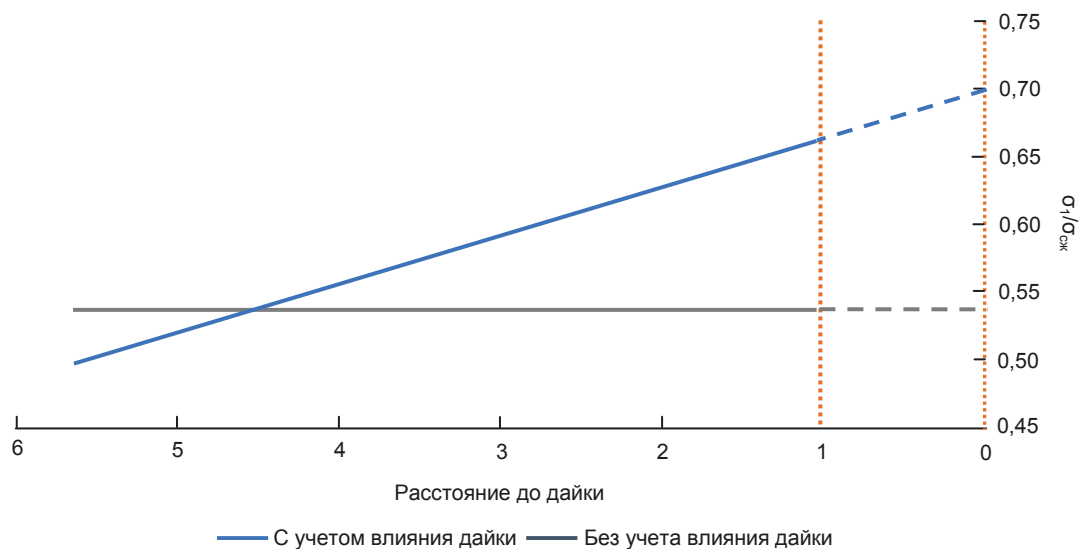


Рисунок 7. Корреляционные зависимости отношения  $\sigma_1/\sigma_{ck}$  от удаленности выработки от дайки по нормали (составлено авторами)  
Figure 7. Correlation dependences of the ratio  $\sigma_1/\sigma_{ck}$  on the distance of the working from the dike along the normal (compiled by the authors)

Трехмерная численная модель разрабатывалась в ПО Simulia Abaqus. Геометрия модели показана на рис. 6. В ней учитывались угол падения и азимут простирания дайки, подсекающей горную выработку.

Полученные по результатам расчета картины распределения напряжений указывают, что при приближении к подсекающей дайке напряжения на контуре выработки возрастают и превышают предел прочности.

Результатом моделирования являлось построение зависимости распределения наибольших главных напряжений  $\sigma_1$  по расстоянию до поверхности дайки.

В качестве критерия, по которому следует выполнять оценку устойчивости целика, используем критерий SRF.

Согласно рекомендациям, выработка может подвергаться шелушению и динамическому заколообразованию при следующем условии:

$$0,5 \leq \sigma_1/\sigma_{ck} \leq 0,7.$$

Как видно, в данном случае при пересечении дайки создается ситуация, в которой напряжения могут привести к горному удару, а при приближении фронта работ к дайке ближе чем на 5,5 м возможны проявления заколообразования.

#### Заключение

Исследование позволило установить влияние даек на распределение напряжений в приконтурном массиве горизонтальной горной выработки.

Необходимость учета литологических разностей в явном виде обусловлена тем, что при ее упрощении и идеализации массива сплошной средой появляются упущения в прогнозе изменения напряженно-деформированного состояния. Следствием может стать неправильный подбор параметров проведения выработки и ее крепи.

Анализ научной литературы показал, что к настоящему моменту существует не так много исследований, посвященных вопросам влияния границ литологических разностей на устойчивость приконтурного массива. Перспективным на-

правлением исследований является многофакторный анализ их расположения с различными деформационными свойствами и геометрическими параметрами относительно проходимой горной выработки и оценка их влияния на устойчивость контура выработки в сложных горно-геологических условиях.

В дальнейших работах предполагается подробнее исследовать влияние литологических неоднородностей на устойчивость горных выработок в зависимости от их геометрических параметров, а также свойств слагающих пород.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Baroň I., Sokol L., Melichar R., Plan L. Gravitational and tectonic stress states within a deep-seated gravitational slope deformation near the seismogenic Periadriatic Line fault // *Engineering Geology*. 2019. Vol. 261. Article number 105284. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105284>
2. Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores // *Eurasian Mining*. 2021. No. 2 (36). С. 3–7. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.01>
3. Wilson L., Head J. W. Tharsis-radial graben systems as the surface manifestation of plume-related dike intrusion complexes: Models and implications // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2002. Vol. 107. No. E8. P. 1–24. <https://doi.org/10.1029/2001JE001593>
4. Zhang Y., Shi W., Liao C., Hu B. Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, North China // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2006. Vol. 80. No. 5. С. 639–647.
5. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. Experience of using expert systems for assessing the stress-strain state of a rock mass for choosing safe methods of mining ore deposits // *Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 198. P. 16–23. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5908>
6. Gospodarikov A. P., Zatsepin M. A. Mathematical modelling of applied problems of rock mechanics and rock massifs // *Journal of Mining Institute*. 2014. Vol. 207. P. 217–221.
7. Gospodarikov A. P., Zatsepin M. A., Meleshko A. V. Numerical modeling based on the finite difference method of some applied problems of geomechanics // *Journal of Mining Institute*. 2009. Vol. 182. P. 238–240.
8. Shabarov A., Kuranov A., Popov A., Tsirel S. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 129. Article number 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912901011>
9. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э. Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2010. № 3. С. 9–18.
10. Корчак П. А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // *ГИАБ*. 2021. № 5. С. 85–98. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_5\\_0\\_85](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_85)
11. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками / А. А. Козырев [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2019. 431 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
12. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / И. М. Петухов, А. М. Ильин, К. Н. Трубецкой (ред.). М.: Изд-во АГН, 1997. 377 с.
13. Chen Y., Ma S., Yang Y., Meng N., Bai J. Application of shallow-hole blasting in improving the stability of gob-side retaining entry in deep mines: A case study // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 19. Article number 3623. <https://doi.org/10.3390/en12193623>
14. Li C. C., Mikula P., Simer B., Hebblewhite B., Joughin W., Feng X., Xu N. Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. Issue 5. P. 1110–1118. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001>
15. Vilner M., Nguen T. T., Korchak P. The assessment of the roof beam stability in mining workings // *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues: Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*. London: CRC Press, 2019. P. 53–57. <https://doi.org/10.1201/9781003017226-7>
16. Petrov D. N., Dolgy I. S., Ochukurov V. I. Influence of tectonic stresses and geological disturbances in the rock mass on the parameters of the stress-strain state around mine workings // *Journal of Mining Institute*. 2010. Vol. 185. P. 132–135.
17. Арзамасцев А. А., Беляцкий Б. В., Травин А. В., Арзамасцева Л. В., Царев С. Е. Дайковые породы в Хибинском массиве: связь с плутоническими сериями, возраст, характеристика мантийных источников // *Петрология*. 2005. Т. 13. № 3. С. 295–318.
18. Геомеханика массивов и динамика выработок глубоких рудников / В. Л. Трушко [и др.]; под ред. Е. И. Шемякина. СПб: СПГГИ, 2000. 396 с.
19. Hoek E., Brown E. T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. Issue 3. P. 445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
20. Kasparyan E. E., Kuznetsov N. N., Shokov A. N., Pak A. K. Dynamic failure conditions in strong rock masses // *Mining informational and analytical bulletin*. 2020. Issue 4. P. 69–84. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
21. Kozyrev A. A., Zhukova S., Zhuravleva O., Onuprienko V. S. Induced seismicity of rock mass: Development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits // *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 9. P. 19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
22. Sinogubov V. Yu., Popov M. G., Vilner M. A., Sotnikov R. O. Influence of stoping on formation of damaged rock zones at boundaries of large cross-section excavations in apatite–nepheline mining // *Gornyi Zhurnal*. 2021. No. 8. P. 26–30. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.08.04>
23. Zhang Q., Zhang X., Wang Z., Xiang W., Xue J. Failure mechanism and numerical simulation of zonal disintegration around a deep tunnel under high stress // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. Vol. 93. P. 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.02.004>
24. Galera J. M., Álvarez M., Bieniawski Z. T. Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison of pressuremeter and dilatometer tests with RMR prediction // *Proceedings of the ISP5-PRESSIO 2005 international symposium, Madrid, Spain*. P. 1–25.

*Статья поступила в редакцию 26 января 2023 года*

# Influence of dikes in a rock mass on the stability of a mine working under the action of a gravitational-tectonic stress field

Anton Dmitrievich KURANOV<sup>1\*</sup>

Polina Vyacheslavovna BASALAEVA<sup>2\*\*</sup>

Vyacheslav Sergeevich ONUPRIENKO<sup>3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> JSC “Giprosvetmet”

<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Kirovsk Branch of JSC “Apatit”, Kirovsk, Murmansk Region, Russia

## Abstract

**The purpose of the research** – to analyse the effect of a complex lithological structure on the stability of mine workings.

**The relevance of the work.** The need to take into account complex geological structure is one of the most important factors affecting the stability of rock outcrops. By this we mean the lithological structure and the presence of lithological heterogeneities. The difference in physical and mechanical, and particularly deformation properties, between lithologic alterations and host rocks can lead to unfavorable rock pressure conditions during excavation and operation.

**The research's methods.** In this work, we study rock mass behavior in the presence of lithologic inhomogeneities with different characteristics using spatial numerical models. Using geological data and rating techniques, the transition from physical and mechanical properties of the sample to the properties of the massif is done.

**The results of the work and its area of application.** The work provides an overview of the occurrence of lithological heterogeneities, and of lithology as a factor influencing the stability of mine workings. Moreover, numerical models with different physical and mechanical properties of dikes were built and analyzed and the actual section of the mine workings underlain by a monkeite dike was taken for the analysis of the influence of lithological differences on the stability of mine workings.

**Conclusion.** The simplification and idealization of massif as a continuous medium leads to loopholes in stress-strain state of massif.

**Keywords:** Stability of mine workings, lithological structure, stress-strain state, apatite-nepheline deposit, numerical simulation.

## REFERENCES

1. Baroň I., Sokol L., Melichar R., Plan L. 2019, Gravitational and tectonic stress states within a deep-seated gravitational slope deformation near the seismogenic Periadriatic Line fault. *Engineering Geology*, vol. 261. Article number 105284. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105284>
2. Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A. 2021, Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores. *Eurasian Mining*, no. 2 (36), pp. 3–7. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.01>
3. Wilson L., Head J. W. 2002, Tharsis-radial graben systems as the surface manifestation of plume-related dike intrusion complexes: Models and implications. *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 107, no. E8, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1029/2001JE001593>
4. Zhang Y., Shi W., Liao C., Hu B. 2006, Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, North China. *Acta Geologica Sinica*, vol. 80, no. 5, pp. 639–647.
5. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. 2012, Experience of using expert systems for assessing the stress-strain state of a rock mass for choosing safe methods of mining ore deposits. *Journal of Mining Institute*, vol. 198, pp. 16–23. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5908>
6. Gospodarikov A. P., Zatsepina M. A. 2014, Mathematical modelling of applied problems of rock mechanics and rock massifs. *Journal of Mining Institute*, vol. 207, pp. 217–221.
7. Gospodarikov A. P., Zatsepina M. A., Meleshko A. V. 2009, Numerical modeling based on the finite difference method of some applied problems of geomechanics. *Journal of Mining Institute*, vol. 182, pp. 238–240.
8. Shabarov A., Kuranov A., Popov A., Tsirel S. 2019, Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass. *E3S Web of Conferences*, vol. 129. Article number 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912901011>
9. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. 2010, Geodynamic risk management at the Khibiny apatite mines. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], no. 3, pp. 9–18. (In Russ.)
10. Korchak P. A. 2021, Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy biulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 5, pp. 85–98. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_5\\_0\\_85](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_85)
11. Kozyrev A. A. [et al.]. 2019, Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and management of geodynamic risks. Apatity, 431 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
12. Petukhov I. M., Ilyin A. M., Trubetskoy K. N. 1997, Prediction and prevention of rock bursts in mines. Moscow, 377 p. (In Russ.)

✉ Kuranov\_AD@pers.spmi.ru

\*\*Basalaeva\_pv@pers.spmi.ru

\*\*\*VOnuprienko@phosago.ru



13. Chen Y., Ma S., Yang Y., Meng N., Bai J. 2019, Application of shallow-hole blasting in improving the stability of gob-side retaining entry in deep mines: A case study. *Energies*, vol. 12, no. 19. Article number 3623. <https://doi.org/10.3390/en12193623>
14. Li C. C., Mikula P., Simer B., Hebblewhite B., Joughin W., Feng X., Xu N. 2019, Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, issue 5, pp. 1110–1118. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001>
15. Vilner M., Nguen T. T., Korchak P. 2019, The assessment of the roof beam stability in mining workings. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues: Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*. London: CRC Press, pp. 53–57. <https://doi.org/10.1201/9781003017226-7>
16. Petrov D. N., Dolgy I. S., Ochukurov V. I. 2010, Influence of tectonic stresses and geological disturbances in rock mass on the parameters of stress-strain state around mine workings. *Journal of Mining Institute*, vol. 185, pp. 132–135.
17. Arzamastsev A. A., Belyatsky B. V., Travin A. V., Arzamastseva L. V., Tsarev S. E. 2005, Dike rocks in the Khibiny massif: connection with plutonic series, age, characterization of mantle sources. *Petrologia* [Petrology], vol. 13, no. 3, pp. 295–318. (In Russ.)
18. Trushko V. L. [et. al]. 2000, Geomechanics of massifs and dynamics of workings of deep mines. Saint Petersburg, 396 p. (In Russ.)
19. Hoek E., Brown E. T. 2019, The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, issue 3, pp. 445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
20. Kasparyan E. E., Kuznetsov N. N., Shokov A. N., Pak A. K. 2020, Dynamic failure conditions in strong rock masses. *Mining informational and analytical bulletin*, issue 4, pp. 69–84. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
21. Kozyrev A. A., Zhukova S., Zhuravleva O., Onuprienko V. S. 2020, Induced seismicity of rock mass: Development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*, no. 9, pp. 19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
22. Sinegubov V. Yu., Popov M. G., Vilner M. A., Sotnikov R. O. 2021, Influence of stoping on formation of damaged rock zones at boundaries of large cross-section excavations in apatite–nepheline mining. *Gornyi Zhurnal*, no. 8, pp. 26–30. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.08.04>
23. Zhang Q., Zhang X., Wang Z., Xiang W., Xue J. 2017, Failure mechanism and numerical simulation of zonal disintegration around a deep tunnel under high stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 93, pp. 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.02.004>
24. Galera J. M., Álvarez M., Bieniawski Z. T. Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison of pressuremeter and dilatometer tests with RMR prediction. *Proceedings of the ISP5-PRESSIO 2005 international symposium*, Madrid, Spain, pp. 1–25.

The article was received on January 26, 2023