

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ЕСТЕСТВЕННОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Э. В. Каспарьян¹, Ю. В. Федотова², Н. Н. Кузнецов¹

¹ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

²ФГБУН Институт горного дела Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН (ХФИЦ ДВО РАН)

Аннотация

Излагается анализ развития представлений о параметрах естественных полей напряжений массивов горных пород от самых первых гипотез и до принятых в настоящее время положений, основанных на результатах непосредственных измерений.

Приведены результаты длительных наблюдений в массиве пород одного из рудников Хибинских апатит-нефелиновых месторождений, а также результаты математического моделирования, на основании которых сформулировано предположение о формировании тектонической составляющей общего поля напряжений за счет энергии, поступающей по некоторым (активным) структурным неоднородностям (разломам) из глубинных слоев Земли. Вследствие этого реальное поле естественных напряжений характеризуется резко неоднородной, мозаичной структурой и иерархичным строением, при котором параметры поля существенно различаются в пределах различных структурных блоков.

Ключевые слова:

геомеханика, массив горных пород, разломы, естественное напряженное состояние, гравитационно-тектоническое поле напряжений, натурные наблюдения, сейсмические события, математическое моделирование.

DEVELOPMENT OF CONCEPTIONS ABOUT THE NATURAL STRESS STATE OF HARD ROCK MASSIFS

Eduard V. Kasparyan¹, Iuliia V. Fedotova², Nikolai N. Kuznetsov¹

¹Mining Institute of KSC RAS

²Mining Institute of FEB RAS

Abstract

The article presents the analysis of development of conceptions about the natural stress field parameters of rock massifs from the very first hypotheses to the currently adopted statements based on the results of direct measurements.

The results of long-term observations in one of the mines of the Khibiny apatite-nepheline deposits are given. Also, with using the mathematical modeling method the assumption of tectonic component formation of the general stress field due to the energy supply from deep layers of the Earth by some (active) structural discontinuities (faults) is formulated.

As a result, the real field of natural stresses is characterized by a sharply heterogeneous and mosaic structure in which the field parameters differ significantly within the various structural blocks.

Keywords:

geomechanics, rock massif, faults, natural stress state, gravitational-tectonic stress field, in situ measurements, seismic events, mathematical modeling.

Введение

Породные массивы как объекты исследования в геомеханике имеют одну очень существенную особенность по сравнению с объектами, рассматриваемыми в механике вообще или в механике твердых деформируемых тел в частности. До производства работ, т. е. еще в своем изначальном состоянии они уже находятся в напряженном состоянии, которое обычно называют *естественным*, или *начальным напряженным состоянием*.

В настоящее время считается, что можно выделить две отдельные, но тесно взаимосвязанные группы основных факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние верхней части земной коры, а следовательно, и начальное напряженное состояние массивов горных пород:

- внешние факторы — проявления планетарных воздействий, в первую очередь от ближайших планет и Солнца;
- внутренние факторы — проявления процессов, происходящих во внутренних слоях Земли и обуславливающих возникновение различных силовых полей, в частности, гравитационных и тектонических сил.

При этом результаты исследований по оценке степени влияния внешних факторов на изменение напряженного состояния массивов горных пород, полученные к настоящему времени, показывают, что эту группу целесообразно рассматривать как причины возможной нестабильности состояния массивов только в пределах достаточно длительных периодов времени и для достаточно крупных участков земной коры. При рассмотрении конкретных вопросов геомеханики применительно к технологии ведения горных работ планетарные силы можно не учитывать при оценке силовых параметров, определяющих условия поведения конкретных участков массива горных пород на данном (ограниченном) отрезке времени.

Что касается второй группы факторов, то здесь представления о природе и механизмах возникновения начального напряженного состояния массивов горных пород менялись по мере развития общих представлений о Земле и о геологических и тектонических процессах в ее недрах.

Одной из первых гипотез (1878 г.) о природе естественных полей напряжений в верхней части земной коры Земли является гипотеза А. Гейма [1], согласно которой массивы горных пород вследствие действия гравитационных сил в течение весьма длительного времени (геологических эпох) находятся в скрыто-пластическом состоянии и поэтому все нормальные компоненты тензора напряжений по всем осям координат равны, а все касательные напряжения равны нулю.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_y = \sigma_z = \gamma H; \\ \tau_{xy} &= \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — нормальные компоненты тензора напряжений по осям координат x, y, z ; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ — касательные компоненты тензора напряжений; γ — объемный вес налегающих пород; H — глубина рассматриваемой точки массива от дневной поверхности.

Другими словами, по А. Гейму естественное напряженное состояние массива горных пород является гидростатическим. Эти представления являлись общепринятыми в течение более 50 лет. Однако дальнейшее изучение свойств пород различных массивов показало, что лишь немногие породы проявляют в достаточной степени пластические свойства, а основная масса пород в большей степени (часто вплоть до потери прочности) склонны к проявлению упругих деформаций.

Исходя из этого академиком АН СССР А. Н. Динником в 1925 г. была сформулирована гипотеза о естественном напряженном состоянии массива пород, предполагавшемся идеально упругой сплошной изотропной средой, в соответствии с распределением упругих напряжений [2], но при этом основными действующими силами по-прежнему предполагались силы гравитации. Тогда компоненты тензора напряжений определяются:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \gamma H; \\ \sigma_x &= \sigma_y = \lambda \gamma H; \\ \lambda &= \frac{\mu}{1 - \mu},\end{aligned}\tag{2}$$

где λ — коэффициент бокового отпора (отношения горизонтальных и вертикальных напряжений); μ — коэффициент Пуассона (отношения поперечных и продольных деформаций пород).

В случае распределения напряжений в массиве пород по А. Н. Диннику гидростатическое состояние пород А. Гейма является частным случаем, когда $\mu = 0,5$, а $\lambda = 1$, что в практике горных работ встречается достаточно редко, например, для массивов, представленных сильно увлажненными глинами или пльвунными породами.

Представления о распределении напряжений в массивах пород на основе использования модели упругого изотропного пространства (гипотеза А. Н. Динника) оказались очень продуктивными и нашли широкое применение в практике ведения горных работ для расчетов устойчивости обнажений пород в выработках, а также для разработки практических мероприятий по обеспечению безопасности. При этом достаточно легко можно было учесть естественную изменчивость свойств реальных массивов, применяя модели более сложных упругих сред, например, трансверсально-изотропного тела.

По мере увеличения опыта ведения горных работ в различных горно-геологических условиях постепенно накапливались данные, которые недостаточно соответствовали представлениям о напряженном состоянии массивов пород согласно гипотезе А. Н. Динника.

Первые такие сообщения появились в начале XIX в. [3], еще до опубликования работ А. Н. Динника, однако потребовалось еще более полувека, чтобы эти факты начали привлекать серьезное внимание исследователей. В частности, в 1960-х гг. в пределах верхних горизонтов Хибинских рудников, на сравнительно небольших глубинах от дневной поверхности, стали наблюдаться разрушения выработок с активным проявлением стреляния горных пород. Эти проявления горного давления не могли быть объяснены с позиций гравитационных моделей и вызвали появление принципиально новой концепции — гравитационно-тектонической модели напряженно-деформированного состояния массива горных пород [4]. В настоящее время эта концепция является общепринятой.

В соответствии с ее положениями естественное поле напряжений в массивах горных пород в общем случае определяется преимущественно совместным действием двух независимых полей — гравитационным и тектоническим.

Гравитационное поле напряжений при этом повсеместно и действует всегда, имеет относительно простую структуру, в общем случае описывается уравнениями (2). Оно обусловлено действием гравитационных сил, которые в соответствии с законом всемирного тяготения Ньютона характеризуются ускорением свободного падения g . Ускорение свободного падения в общем случае является функцией расстояния r от центра Земли и плотности пород ρ . Во многих практических расчетах ускорение свободного падения можно принимать постоянным и равным $g = 981 \approx 1000 \text{ см/с}^2$.

Существенно большей сложностью отличаются тектонические поля от гравитационных, они формируются за счет поступления энергии из глубинных слоев Земли и в настоящее время обнаруживаются непосредственно или косвенно в большинстве (~60 %) массивов, представленных высокопрочными изверженными породами, с меньшей вероятностью (~20 %) — в массивах осадочных пород.

Анализ результатов инструментальных измерений параметров гравитационно-тектонических полей, выполненных в различных точках мира [5, 6], позволил исследователям выдвинуть различные гипотезы происхождения тектонических компонентов полей напряжений общего вида.

Из этих гипотез наиболее обоснованными являются представления, по которым горизонтальные (или близкие к ним) напряжения связываются с процессами внутренней тектонической деятельности Земли, в том числе с поднятиями магмы по разломам всемирной рифтовой системы, обуславливающими перемещения тектонических плит земной коры. Считается, что движение и взаимодействие плит является источником возникновения горизонтальных напряжений [7, 8], которые от 3 до 20 раз могут превышать величины напряжений, обусловленные действием веса налегающих пород.

На основании сформулированных представлений о гравитационно-тектонических полях стало возможным удовлетворительно объяснять специфические особенности деформирования и разрушения пород в горных выработках и прогнозировать грозные динамические проявления горного давления типа горных ударов и техногенных землетрясений.

При этом исследователи основное внимание уделяли определению величин максимальных компонент поля напряжений и их направлениям в пространстве, оставляя без должного внимания особенности структуры гравитационно-тектонических полей и соотношений между их компонентами. В результате некоторые особенности гравитационно-тектонических полей напряжений массивов пород не получали удовлетворительных объяснений.

В первую очередь это касается отсутствия физического обоснования особенностей гравитационно-тектонических полей напряжений, в частности, преимущественно горизонтального направления тектонических напряжений: узкой направленности максимальных горизонтальных напряжений по отношению к элементам залегания рудных тел (преимущественно вдоль простираения), резкому различию величин горизонтальных компонент поля между собой.

В результате выполнения многолетнего мониторинга геомеханического состояния массивов пород на различных месторождениях Кольского п-ова для упомянутых вопросов удалось сформулировать объяснения и предложить свое видение происхождения гравитационно-тектонических полей напряжений, по крайней мере в пределах участков в массивах пород, ограниченных размерами шахтных полей, и в течение периодов времени, сопоставимых со временем отработки месторождений.

Методика выполнения и результаты исследований в районе Саамского разлома Кукисвумчоррского месторождения апатит-нефелиновых руд

Результаты деформационного и сейсмического мониторинга состояния массива пород.

В 2015 г. на основании результатов непосредственных многолетних измерений перемещений пород Саамского разлома в пределах шахтного поля Кировского рудника КФ АО «Апатит» нами было сформулировано предположение о возникновении горизонтальных напряжений вследствие постоянного подвода энергии из глубинных слоев Земли по определенным (активным) разломам. Это предположение снимает ряд вышеуказанных вопросов и противоречий и удовлетворительно объясняет многие явления, которые проявляются в массивах пород [9]. По сути, оно фактически повторяет механизм возникновения полей напряжений в Земной коре вследствие подъема магмы по разломам Мировой рифтовой системы, но переносит этот механизм на существенно более мелкие структуры типа региональных разломов (рис. 1).

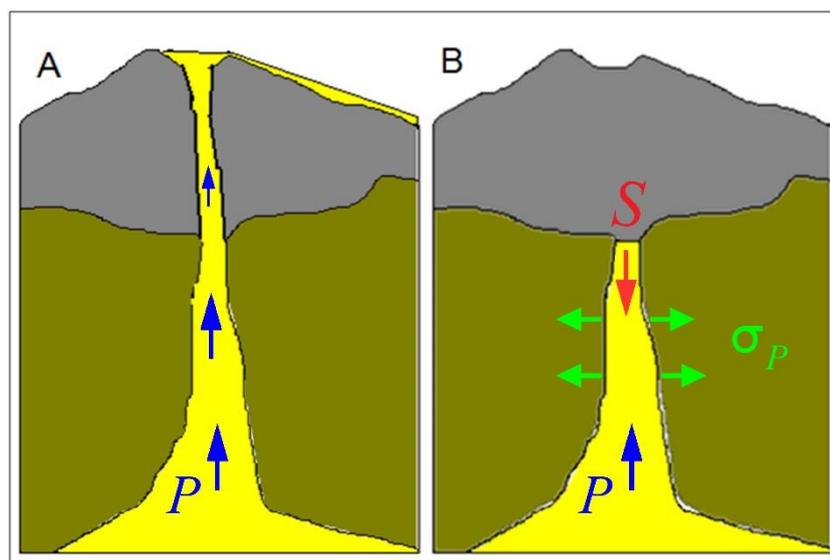


Рис. 1. Схема поднятий тела разлома при отсутствии противодействующих сил (А) и при наличии сил сопротивления (В):

P — давление из нижележащих слоев по разлому; σ_p — растягивающие напряжения; S — силы сопротивления

Fig. 1. Scheme of the fault body elevations in the absence of opposing forces (A) and in the presence of resistance forces (B):

P — pressure from the underlying layers along the fault; σ_p — tensile stresses; S — resistance forces

Развивая высказанное предположение, мы можем прийти к заключению, что силы поднятия в теле разлома неизбежно должны уравновеситься силами сопротивления со стороны веса определенного объема пород в теле того же разлома и силами трения между породами тела разлома и вмещающего массива. В этом случае прекращается перемещение пород в разломе, но вследствие продолжающейся энергетической подпитки возникают силы давления на борта разлома, т. е. нормальные к его контактными плоскостям.

Если указанный механизм наблюдается в случае разломов с близвертикальной ориентацией в пространстве (а таких разломов большинство), то силы давления на борта разломов имеют горизонтальное направление. При другой ориентации разломов, в частности наклонной, силы давления будут иметь наклонное направление и изменять величину вертикальных гравитационных напряжений (что достаточно часто фиксируется в ходе непосредственных натурных измерений, но пока не находило удовлетворительного объяснения).

С учетом резких различий деформационных характеристик пород тела разлома и вмещающих пород становится понятным преимущественное направление максимальных напряжений в направлении, нормальном к простиранию разломов, и минимальных — в направлении простирания самого разлома. При этом необходимо иметь в виду, что рассмотренный механизм образования компонент напряжений гравитационно-тектонического поля возникает только в случае некоторых так называемых активных разломов, выявление которых является основной задачей всех работ по геодинамическому районированию массивов пород месторождений.

Непосредственные наблюдения смещений в теле Саамского разлома и его окружающем массиве в пределах шахтного поля выполнялись путем высокоточного нивелирования по пунктам специально заложенных полигонов в период 1991–2013 гг. (рис. 2).

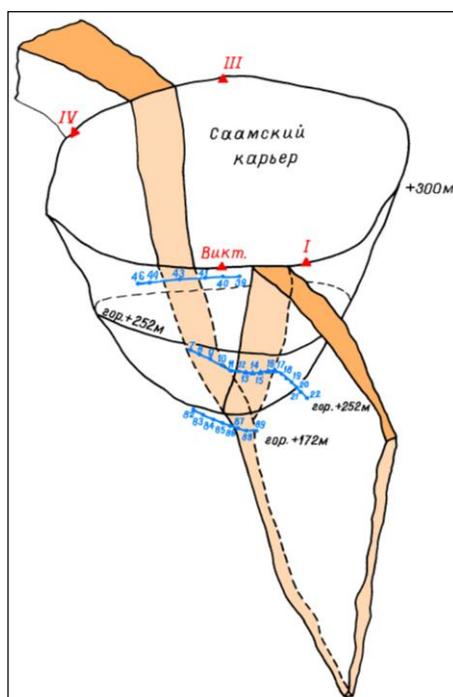


Рис. 2. Общая схема расположения нивелирных и светодальномерных полигонов в районе Саамского разлома (Кировский рудник КФ АО «Апатит»):

▲ III — пункты наземного светодальномерного полигона в Саамском карьере;

40 39 — пункты подземных нивелирных полигонов

Fig. 2. The general layout of the levelling and optical distance measurement testing sites in the Saamsky fault area (Kirovsky mine, KB Apatit JSC):

▲ III — points of the surface optical distance measurement testing site in the Saamsky open pit;

40 39 — points of underground levelling testing sites

После 2013 г. в силу различных причин проводить наблюдения было невозможно и только в феврале 2018 г. удалось выполнить одну серию наблюдений на горизонте +252 м. Результаты всех измерений для наиболее активных реперов, располагающихся в теле Саамского разлома на горизонте +252 м приведены на рис. 3. Как следует из данных рис. 3, результаты, полученные в феврале 2018 г., т. е. через 4,5 года после последнего измерения в 2013 г., показали отсутствие подъема тела разлома и практически полное совпадение (в пределах точности измерений) положения реперов с предыдущими измерениями.

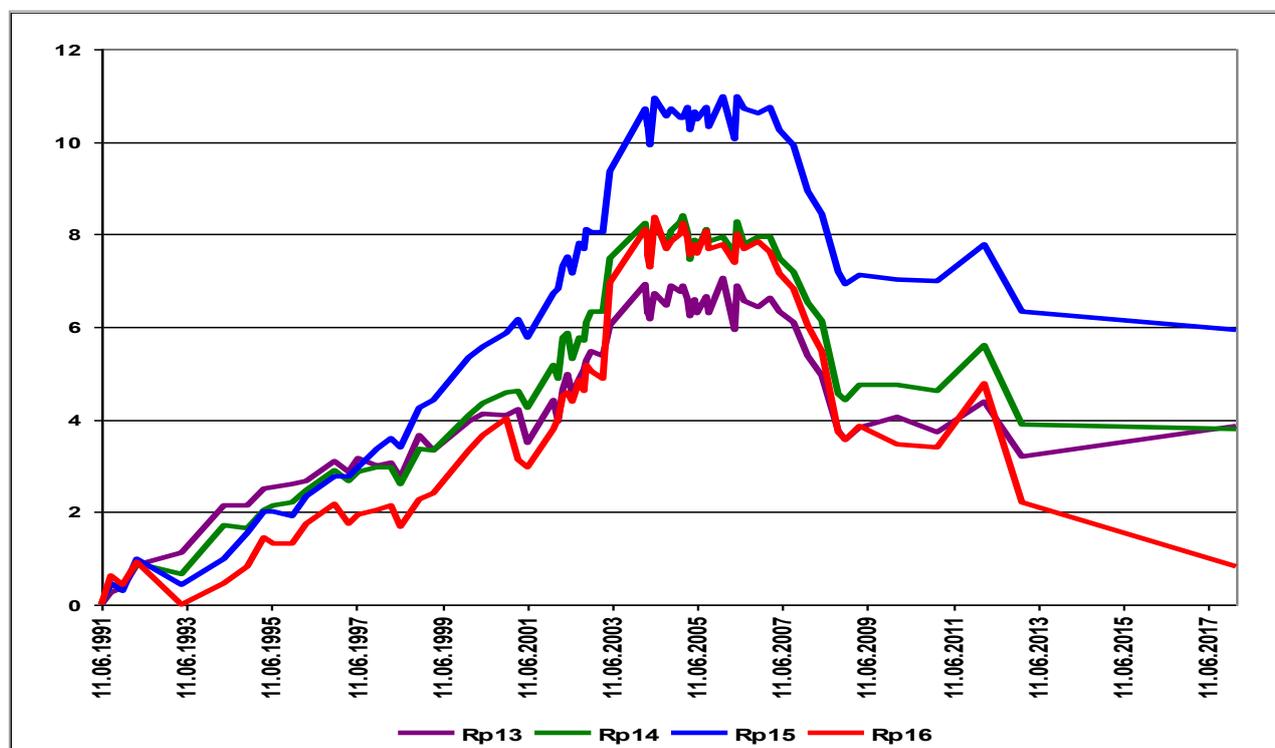


Рис. 3. Результаты измерений вертикальных перемещений реперов в теле Саамского разлома на горизонте +252 м (Кировский рудник КФ АО «Апатит»)

Fig. 3. The results of measurements of the vertical displacements of reference benchmarks in the Saamsky fault body, level +252 m (Kirovsky mine, KB Apatit JSC)

Это может свидетельствовать о двух вариантах состояния разлома:

- первый вариант — подток энергии из глубинных слоев прекратился, а тело разлома находится в стабильном разгруженном состоянии;
- второй вариант — подток энергии из глубинных слоев продолжается, но перемещения пород разломной зоны затруднены (компенсируются силами сопротивления), а потому нарастает степень напряженности самого тела разлома, которая передается окружающему массиву.

По информации линейных работников рудника, состояние массива в районе Саамского разлома в настоящее время характеризуется достаточно высокой степенью напряженности. Об этом также свидетельствуют результаты мониторинга с помощью автоматизированной системы контроля сейсмического состояния массива (АСКСМ) Кировского рудника, которая фиксирует многочисленные сейсмические события различного энергетического ранга в районе Саамского разлома (рис. 4).

С учетом условий проведения горных работ в районе Саамского разлома и данных рис. 4 второй вариант геомеханической ситуации представляется более реальным.

Об этом же свидетельствуют данные о выделившейся сейсмической энергии в районе Саамского разлома в период 2008–2018 гг. (рис. 5).

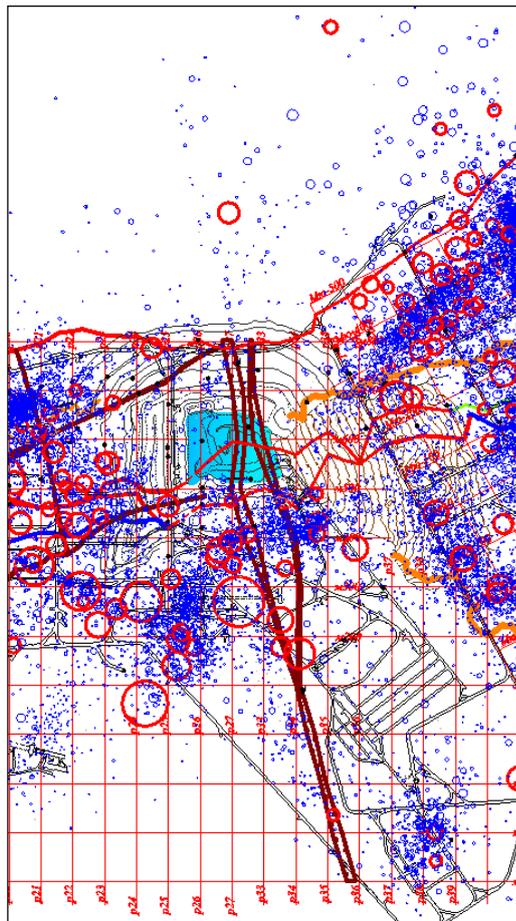


Рис. 4. Пространственное распределение сейсмических событий вокруг Саамского разлома (Кировский рудник КФ АО «Апатит») за период 2008–2018 гг.

Окружности обозначают сейсмические явления, диаметр окружностей характеризует мощность выделяемой энергии: синие — слабые события, красные — сильные. Бордовым цветом выделены границы разрывных нарушений Саамского разлома, голубым — затопленная часть карьера. Линии: черные — выработки; красные — граница рудного тела; оранжевые — проекция бровки обрушения

Fig. 4. Spatial distribution of seismic events around the Saamsky fault (Kirovsky mine, KB Apatit JSC) for 2008–2018. Circles — seismic events; the circles' diameter characterizes the power of the emitted energy: blue — weak events; red — strong. Burgundy — faults; blue — the flooded part of the open pit. Lines: black — openings; red — the ore body boundary; orange — a projection of the failure edge

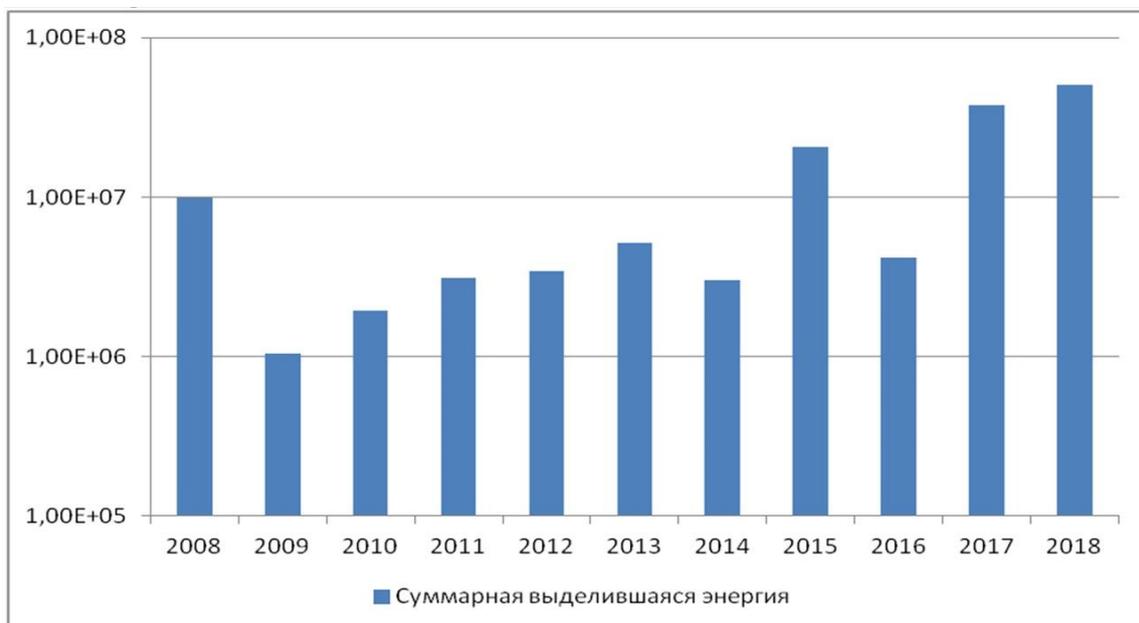


Рис. 5. Распределение количества выделившейся сейсмической энергии (суммарной по годам) в районе Саамского разлома за период 2008–2018 гг. (Кировский рудник КФ АО «Апатит»).

Гистограмма составлена с. н. с. Горного института КНЦ РАН О. Г. Журавлёвой по материалам АСКСМ Кировского рудника КФ АО «Апатит»

Fig. 5. The distribution of the amount of released seismic energy (total for years) in the Saamsky fault area for the period of 2008–2018 (Kirovsky mine, KF Apatit JSC). The histogram is compiled by O. Zhuravleva, Senior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS, based on materials of automated monitoring system for the seismic state of the rock mass of the Kirovsky mine, KF Apatit JSC

Таким образом, период 2008–2018 гг. характеризуется одновременно прекращением подъема тела разлома (рис. 3) и увеличением степени напряженности массива в непосредственной близости от разлома (рис. 5). Это подтверждает предположение об энергетической подпитке массива непосредственно через Саамский разлом и связь этой подпитки с напряженностью массива, т. е. тектоническим полем напряжений.

Результаты математического моделирования напряженного состояния массива пород в районе Саамского разлома.

С целью проверки высказанного предположения о постоянной энергетической подпитке массива по Саамскому разлому и уточнения условий возникновения высоких горизонтальных напряжений было проведено математическое моделирование с применением метода конечных элементов для участка массива пород в пределах шахтного поля Кировского рудника КФ АО «Апатит» между Северным и Саамским разломами.

Моделируемый участок представляет собой гористую местность с высотами до 1500 м и различными физико-механическими свойствами для рудного тела, вмещающих пород и разломов (рис. 6), в общих чертах соответствует реальной ситуации массива пород Кировского рудника.

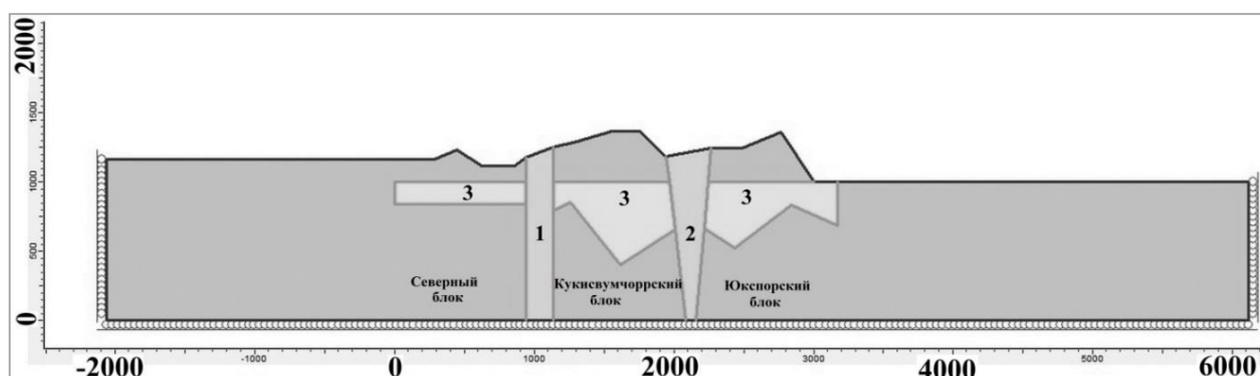


Рис. 6. Модель исследуемого участка массива пород:
1 — Северный разлом; 2 — Саамский разлом; 3 — рудное тело;
остальные блоки — вмещающие породы

Fig. 6. Model of the studied rock mass sector:
1 — North fault; 2 — Saamsky fault; 3 — ore body; the remaining blocks are host rocks

На основании данных экспериментальных исследований для блоков модели были приняты следующие физико-механические свойства:

- разломные зоны — объемный вес $\gamma = 1,3 \text{ г/см}^3$, модуль упругости $E = 1,0 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,49$;
- вмещающие породы — объемный вес $\gamma = 2,5 \text{ г/см}^3$, модуль упругости $E = 72,2 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$;
- рудное тело — объемный вес $\gamma = 2,0 \text{ г/см}^3$, модуль упругости $E = 65,6 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,20$.

Моделируемые структуры — Северный и Саамский разломы — являются структурами III порядка и представляют собой границы Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений.

В частности, Северный разлом является северо-западной границей Кукисвумчоррского месторождения, залегает практически вертикально вкрест простирания рудного тела на глубину ориентировочно 40 км, имеет сложное строение и мощность до 200 м.

Саамский разлом является одновременно восточной границей Кукисвумчоррского месторождения и западной границей Юкспорского месторождения. Он залегает также практически отвесно вкрест простирания рудного тела на глубину ориентировочно 36 км. Разлом имеет сходное с Северным разломом строение и переменную мощность от 10 до 136 м.

Для условий исследуемой модели учитывалось действие веса пород. У боковых границ фиксировались перемещения по координате X , у нижней границы — по координате Y .

Всего для модели было рассмотрено пять различных вариантов граничных условий.

Первый вариант представляет собой модель с закреплением нижней и боковых границ и действием только гравитационных сил. На рис. 7 приведено распределение горизонтальных σ_{xx} , вертикальных σ_{yy} и касательных τ_{xy} компонентов поля напряжений.

Для этих граничных условий в целом характерно постепенное увеличение значений всех напряжений с глубиной. При этом величины горизонтальных напряжений σ_{xx} достаточно малы и составляют единицы мегапаскалей. Направления главных напряжений σ_1, σ_3 — соответственно преимущественно вертикальное и горизонтальное. Величины касательных напряжений τ_{xy} — минимальны.

Эта ситуация характерна для состояния массива, когда разломы являются неактивными и по ним энергия из глубинных слоев не поступает.

В качестве **второго варианта** рассмотрена ситуация, когда к нижней границе модели на всем протяжении исследуемого участка массива горных пород приложена нагрузка, равная 100 МПа (рис. 8).

В этом случае в нижней части межразломного пространства формируются высокие сжимающие напряжения до 250 МПа, превышающие по своим значениям вертикальные составляющие. В средней и верхней части моделируемого пространства наблюдаются высокие растягивающие напряжения (до –200 МПа). Также для заданных граничных условий установлено, что ниже отметки 400 м в межразломном пространстве и в разломных зонах главные напряжения σ_1 имеют субгоризонтальную ориентацию, а выше этой отметки — субвертикальную.

В целом, полученные результаты мало соответствуют реальной горнотехнической ситуации в рассматриваемом массиве пород.

В **третьем варианте** рассматривалась ситуация, когда нагрузка, снизу равная 100 МПа (рис. 9), приложена только к разломным зонам, т. е. моделируется эффект поступления энергии по разломам, но при этом разломы сверху открыты и ничто не препятствует перемещению пород в теле разлома вверх.

В этом случае горизонтальные напряжения σ_{xx} формируются только в нижней части моделируемой области. В верхней части горизонтальные напряжения близки к нулевым значениям, вертикальные компоненты по своим значениям практически соответствуют величинам при действии только гравитации (рис. 7).

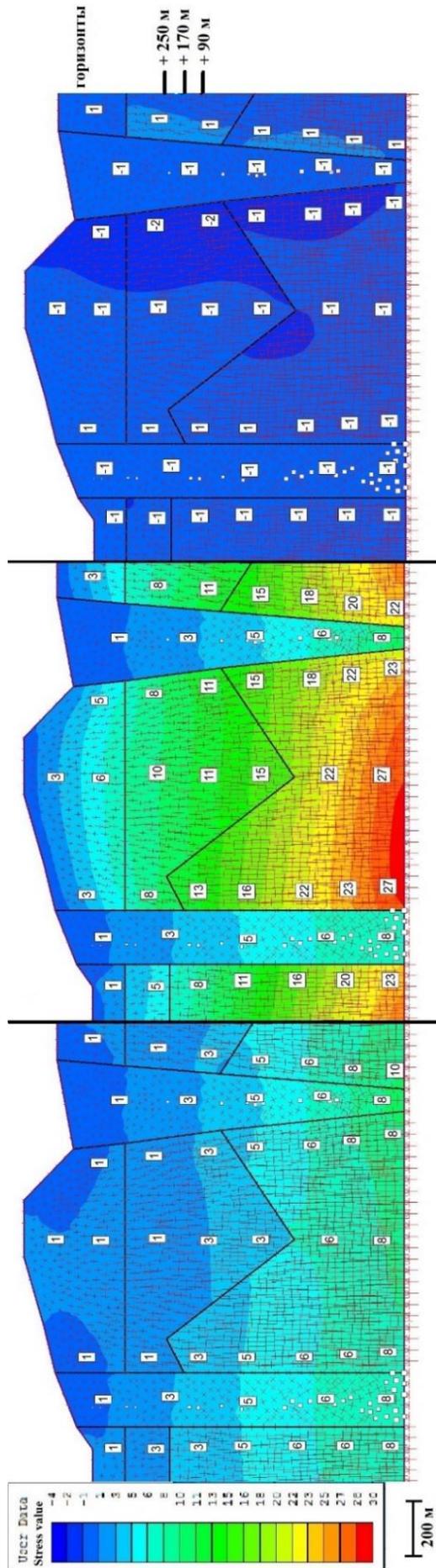
При этом необходимо иметь в виду, что действующая по разломам нагрузка уравнивается весом пород разломной зоны и геометрические параметры разломных зон существенно влияют на напряженное состояние массива горных пород.

Этот вариант по распределению напряжений мало отличается от варианта, когда массив нагружен только гравитационными силами.

В **четвертом варианте** рассмотрена ситуация, когда нагрузка, снизу равная 100 МПа, приложена к разломным зонам, но при этом разломы сверху закрыты и вертикальные перемещения ограничиваются (рис. 10).

В этом варианте в нижней части моделируемого пространства появляются небольшие по величине горизонтальные напряжения сжатия (до 10 МПа), вертикальные напряжения в межразломном пространстве плавно возрастают сверху вниз, но имеют небольшие значения, касательные напряжения небольшие по величине.

При увеличении нагрузки на разломы снизу (**пятый вариант**) до 500 МПа (рис. 11) зона действия горизонтальных напряжений увеличивается, напряжения существенно возрастают, а в верхней части моделируемой области наблюдаются горизонтальные напряжения растяжения. Вертикальные напряжения по величине меньше горизонтальных, касательные напряжения имеют средние значения.



а б

Рис. 7. Распределение горизонтальных σ_{xx} (а), вертикальных σ_{yy} (б) и касательных τ_{xy} (в) компонентов поля напряжений в блоках модели при закреплении нижней и боковых границ и действии только гравитационных сил (цифры обозначают значения напряжений, МПа; стрелками показано направление действия главных максимальных σ_1 и минимальных σ_3 напряжений)

Fig. 7. Distribution of horizontal σ_{xx} (a), vertical σ_{yy} (б) and tangential τ_{xy} (в) components of the stress field in the model blocks when the lower and lateral boundaries are fixed and only gravitational forces act (the numbers indicate the stress values, МPa; arrows indicate the direction of the principal maximum σ_1 and minimum σ_3 stresses)



б

б

а

Рис. 8. Распределение горизонтальных σ_{xx} (а), вертикальных σ_{yy} (б) и касательных τ_{xy} (в) компонентов поля напряжений в блоках модели при закреплении нижней и боковых границ и действии нагрузки снизу величиной 100 МПа на весь участок исследуемого массива горных пород (цифры обозначают значения напряжений, МПа; стрелками показано направление действия главных максимальных σ_1 и минимальных σ_3 напряжений)

Fig. 8. Distribution of horizontal σ_{xx} (a), vertical σ_{yy} (б) and tangential τ_{xy} (в) components of the stress field in the model blocks when the lower and lateral boundaries are fixed and the load is loaded below 100 MPa over the entire section of the rock mass under study (figures indicate the values stress, MPa; arrows indicate the direction of action of the principal maximum σ_1 and minimum σ_3 stresses)

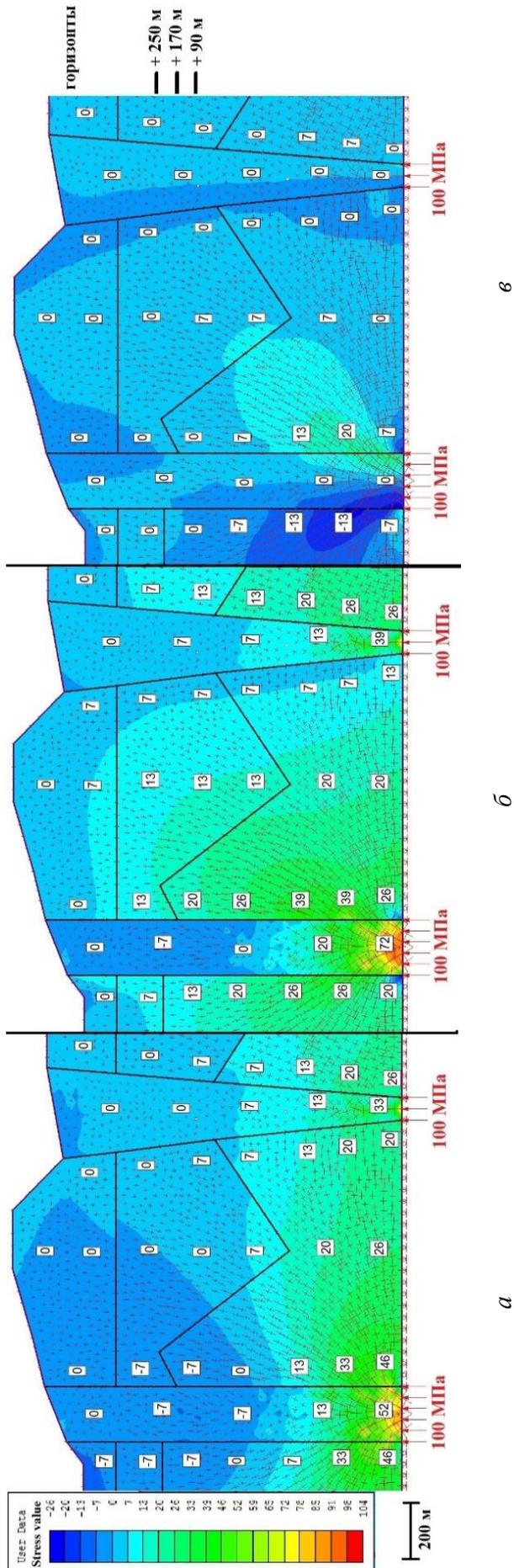


Рис. 9. Распределение горизонтальных σ_{xx} (а), вертикальных σ_{yy} (б) и касательных τ_{xy} (в) компонентов поля напряжений в блоках модели при действии нагрузки величиной 100 МПа снизу по разломным зонам (цифры обозначают значения напряжений, МПа; стрелками показано направление действия главных максимальных σ_1 и минимальных σ_3 напряжений)

Fig. 9. Distribution of horizontal σ_{xx} (a), vertical σ_{yy} (b) and tangential τ_{xy} (v) components of the stress field in the model blocks under a load of 100 MPa from the bottom along fault zones (figures indicate stress values, MPa; arrows indicate the direction of the principal maximum σ_1 and minimum σ_3 stresses)

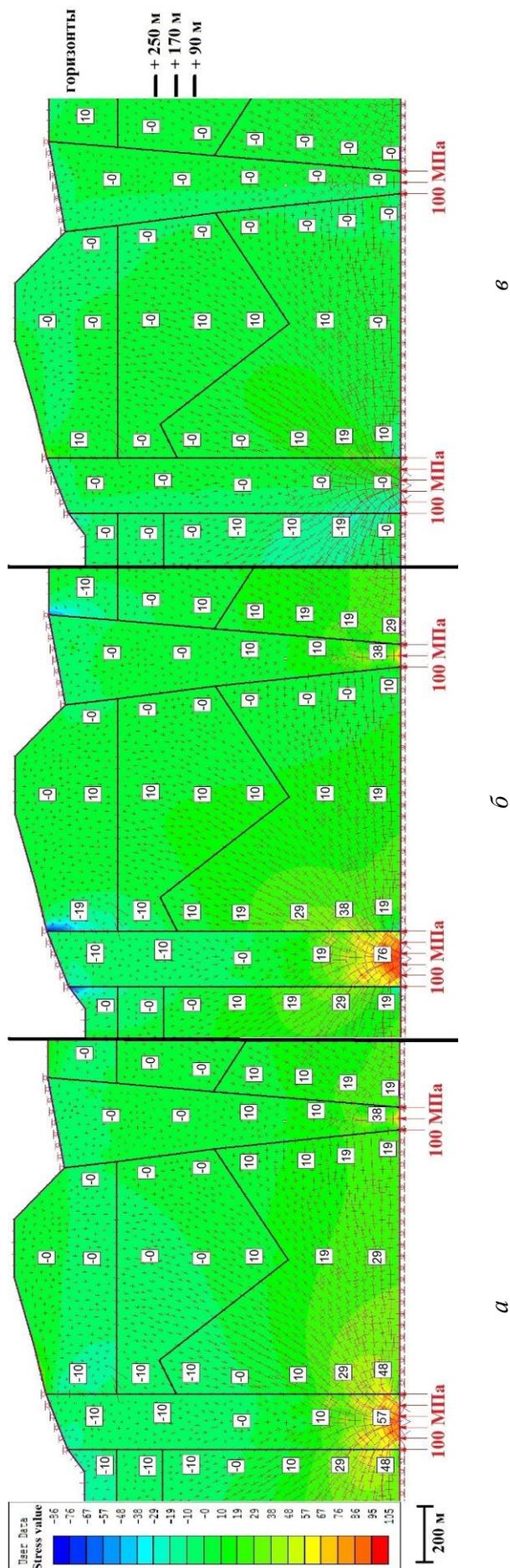


Рис. 10. Распределение горизонтальных σ_{xx} (а), вертикальных σ_{yy} (б) и касательных τ_{xy} (в) компонентов поля напряжений в блоках модели при действии нагрузки величиной 100 МПа снизу по разломным зонам и при ограничении вертикальных перемещений по разломам сверху (цифры обозначают значения напряжений, МПа; стрелками показано направление действия главных максимальных σ_1 и минимальных σ_3 напряжений)

Fig. 10. Distribution of horizontal σ_{xx} (a), vertical σ_{yy} (b) and tangential τ_{xy} (c) components of the stress field in the model blocks under a load of 100 MPa below the fault zones and with limited vertical displacements along the top (figures indicate stress values, MPa; arrows indicate the direction of action of the principal maximum σ_1 and minimum σ_3 stresses)

Обсуждение полученных результатов и выводы

Результаты проведенного моделирования принципиально подтверждают высказанное предположение о постоянной подпитке энергией через активные разломные зоны в исследуемом массиве и показывают, что в этом случае возможно формирование естественных горизонтальных напряжений, существенно превышающих гравитационные. Наличие структурных неоднородностей в массиве горных пород может привести к изменению величин действующих горизонтальных напряжений — к формированию растягивающих или существенных сжимающих напряжений в околоразломном пространстве, при этом чем больше разница в физико-механических свойствах таких структур, тем значительнее изменение напряженного состояния массива.

Полученные данные свидетельствуют о том, что по мере развития геомеханики и накопления экспериментальных и натурных данных наблюдается устойчивая тенденция постепенного перехода от гипотез однородных полей напряжений в массиве пород, обусловленных гравитацией [1] или совместно гравитационными и тектоническими силами [4], к представлениям о мозаичности полей напряжений [10, 11] и, по-видимому, иерархичности их в полном соответствии с иерархично-блочными представлениями о структуре массивов горных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heim A. Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Topographie der Toedi-Windgaellen-Gruppe, Vale. 1878.
2. Динник А. Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты // Инж. работник. 1925. № 7. С. 1–12.
3. Левинсон-Лессинг Ф. Ю., Зайцев А. К. К вопросу о давлении в тоннелях // Доклады Тоннельной комиссии при Инженерном совете Министерства путей сообщения. Пг., 1915. С. 1–34.
4. Марков Г. А., Турчанинов И. А. О напряженном состоянии массива скальных пород, не нарушенного выработками // Проблемы механики горных пород. Алма-Ата: Наука, 1966. С. 260–267.
5. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.
6. Hast N. The measurement of rock pressure in mines // Sveriges Geologiska Undersokning. 1958. № 560. P. 183.
7. Кокс А., Харп Р. Тектоника плит: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 427 с.
8. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Развитие Земли: учебник / под ред. акад. РАН В. А. Садовниченко. М.: Изд-во МГУ, 2002. 560 с.
9. Каспарьян Э. В., Федотова Ю. В. Напряженно-деформированное состояние массива пород Хибинских месторождений и задачи геомеханического районирования // Горн. информ.-аналит. бюл. 2015. № 5. М.: Горная книга, 2015. С. 97–106.
10. Панжин А. А., Сашурин А. Д. Механизм формирования аварийных ситуаций различного масштаба вследствие современных геодинамических движений // Черная металлургия. 2017. № 1. С. 21–25.
11. Инновационная технология диагностики геодинамической активности геологической среды и оценки безопасности объектов недропользования / А. Д. Сашурин [и др.] // Горн. журн. 2017. № 12. С. 16–20.

Сведения об авторах

Каспарьян Эдуард Варужанович — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: kasp@goi.kolasc.net.ru

Федотова Юлия Викторовна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института горного дела ДВО РАН

E-mail: fjulia@mail.ru

Кузнецов Николай Николаевич — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: nikavalon@mail.ru

Author Affiliation

Eduard V. Kasparyan — Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Mining Institute of KSC RAS

E-mail: kasp@goi.kolasc.net.ru

Luliia V. Fedotova — PhD (Engineering), Senior Researcher, Mining Institute of FEB RAS

E-mail: fjulia@mail.ru

Nikolai N. Kuznetsov — Researcher, Mining Institute of KSC RAS

E-mail: nikavalon@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Каспарьян, Э. В. Развитие представлений о естественном напряженном состоянии массивов скальных пород / Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова, Н. Н. Кузнецов // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 3 (11). — С. 65–79.

Reference

Kasparyan Eduard V., Fedotova Luliia V., Kuznetsov Nikolai N. Development of Conceptions about the Natural Stress State of Hard Rock Massifs. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 3 (11), pp. 65–79. (In Russ.).