

УДК 622.831

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.064

Кузнецов Николай Николаевич
младший научный сотрудник,
Горный институт КНЦ РАН,
184209 г. Апатиты, Мурманская обл.,
ул. Ферсмана, 24
e-mail: nikavalon@mail.ru

Kuznetsov Nick N.
junior researcher,
Mining institute of KSC RAS ,
184209 Apatite, Murmansk region,
24 Fersman st..
e-mail: nikavalon@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ОБВОДНЕННОСТИ НА
ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ИЕРАРХИЧНО-БЛОЧНОЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

**STUDY OF WATERCUT INFLUENCE
ON THE ENERGY SATURATED STATE
OF HIERARCHICALLY BLOCK
GEOLOGICAL MEDIUM**

Аннотация:

Изучено влияние обводненности разломов на энергонасыщенное состояние блоков иерархично-блочной геологической среды. Проведено сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными, установленными на образцах горных пород. На основании этого сопоставления определена связь обводненных разломов с динамическими проявлениями горного давления при ведении горных работ.

Ключевые слова: обводненность, энергонасыщенность, энергия деформирования, напряжение, модель, образец

Abstract:

Water-cut faults influence on the energy saturated blocks' state of hierarchically-block geological medium has been studied. Comparison of numerical modeling results and experimental ones determined on rock samples has been carried out. On the basis of the comparison the relation between water-cut faults and rock pressure dynamical manifestation while mining is determined.

Key words: water-cut, energy saturation, energy of deforming, stress, model, sample

Введение

Один из подходов к прогнозированию удароопасного состояния обрабатываемых месторождений заключается в оценке их энергонасыщенности по величинам критической удельной энергии деформирования образцов горных пород и результатам численного моделирования [1, 2, 3]. При этом важным вопросом является учет влияния обводненности на энергонасыщенное состояние таких месторождений.

Хибинский массив (Кольский полуостров), как известно, сложен преимущественно интрузивными скальными горными породами. Особенностью таких пород является высокая степень аккумуляции в них упругой энергии, что при их разрушении увеличивает вероятность динамического проявления горного давления. Для прогноза таких событий была проведена оценка энергонасыщенного состояния Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений с учетом влияния обводненности.

Результаты и обсуждение

Исследование влияния обводненности на энергетическое состояние расчетных моделей иерархично-блочной среды на примере Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений (рис. 1) проведено методом граничных элементов. Для этого по результатам структурного районирования для гор. +250 м выделили 9 блоков, ограниченных разломами и переходными зонами от одного типа пород к другому (рис. 2). Блоки I, IV, V и IX сложены вмещающими породами, III, VII и VIII – апатит-нефелиновыми рудами, II и VI – породами разломных зон. Масштаб был условно принят как 1:1000 м. Саамский разлом, разделяющий группы блоков I-IV и V-IX, согласно условиям модели, не был выделен в отдельный блок, однако его влияние на эти группы было учтено при моделировании и расчете удельной энергии деформирования блоков.

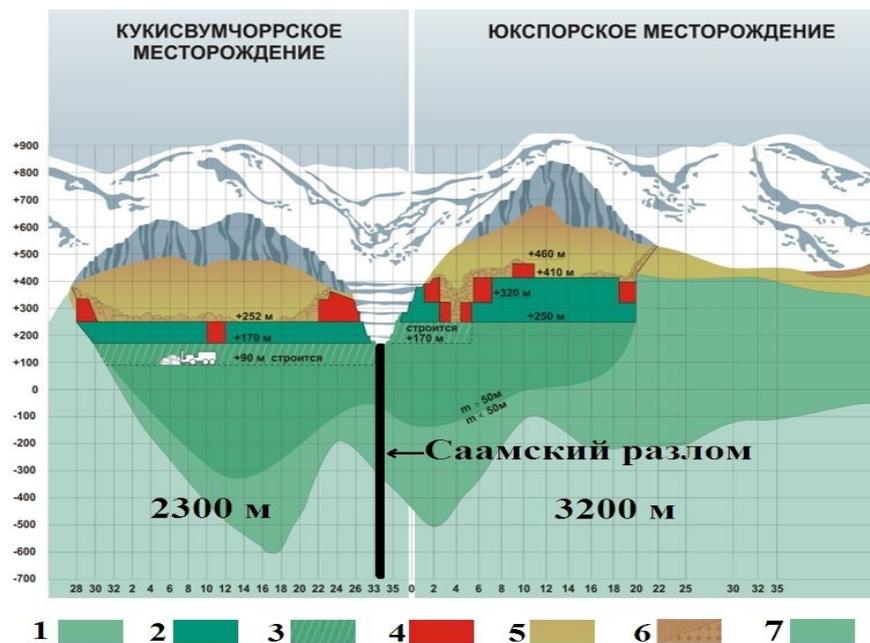


Рис. 1 – Карта (вертикальный разрез)

Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений:

- 1 – промышленные запасы, 2 – вскрытые запасы, 3 – строящиеся горизонты,
- 4 – подготовленные к выемке запасы, 5 – отработанные запасы,
- 6 – вмещающие породы, 7 – промышленные запасы с мощностью рудного тела менее 50 м

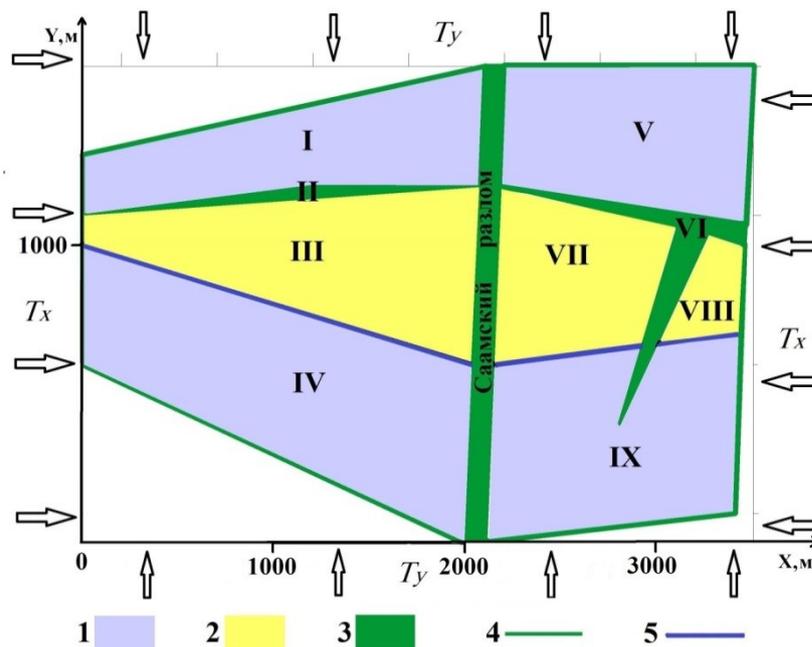


Рис. 2 – Расчетная (первая) модель иерархично-блочной среды

на примере гор. +250 м Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений (вид сверху):

- 1 – вмещающие породы; 2 – рудное тело; 3 – разломная зона; 4 – граница блоков, представленная разломами; 5 – граница блоков, имеющих разные физические свойства;
- римские цифры – номера блоков; T_x и T_y – сжимающие горизонтальные напряжения

Основные расчетные параметры для построения первой модели были выбраны на основании результатов испытаний: для вмещающих пород модуль упругости и коэффициент Пуассона – $E_{\text{вмещ}}=7,22 \cdot 10^4$ МПа и $\nu_{\text{вмещ}}=0,28$; для рудного тела – $E_{\text{руд}}=6,56 \cdot 10^4$ МПа и $\nu_{\text{руд}}=0,20$; для разломных зон – $E_{\text{раз}}=2,62 \cdot 10^4$ МПа и $\nu_{\text{раз}}=0,25$. В качестве граничных

условий по данным проведенного метода разгрузки на исследуемых месторождениях выбрано значение сжимающего горизонтального напряжения T_x равным 50 МПа и другого горизонтального напряжения $T_y - 0,5T_x$ (т. е. 25 МПа).

По результатам моделирования методом граничных элементов для первой иерархично-блочной модели были рассчитаны изменения значений главных напряжений σ_1 и σ_2 (имеются в виду относительные главные напряжения σ_1/T_x (рис. 3) и σ_2/T_x (рис. 4)) в блоках.

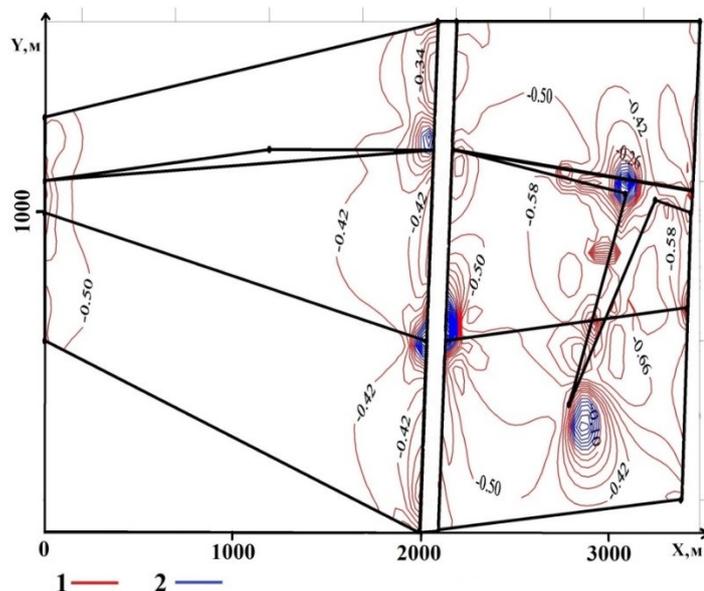


Рис. 3 – Распределение значений главных напряжений σ_1 (первая модель):
1 – сжимающие напряжения, 2 – растягивающие напряжения

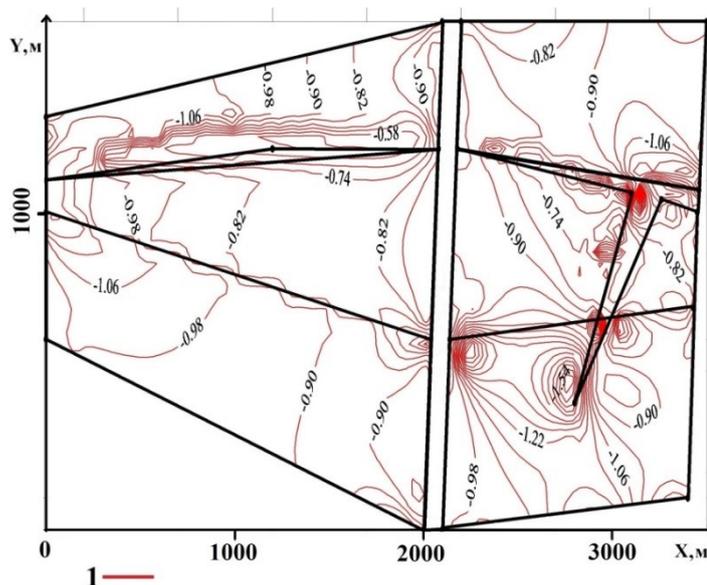


Рис. 4 – Распределение значений главных напряжений σ_2 (первая модель):
1 – сжимающие напряжения

Главные напряжения σ_1 (см. рис. 3) ориентированы преимущественно вдоль разломов, идущих сверху вниз. Их повышенная концентрация наблюдается в местах пересечения разломов друг с другом и с границей блоков вмещающих пород и рудного тела, а также возле концов разломной зоны. Особенностью этой модели является наличие не только сжимающих, но и растягивающих напряжений σ_1 . Они, главным образом, локализируются в местах пересечения разломов и границ блоков разных физических свойств (синие линии на рис. 2) с разломами. Блоки вмещающих пород имеют более высокие

значения прочности, модуля упругости и плотности, чем рудное тело и нарушенные породы разломной зоны. В связи с этим при действии горизонтального сжимающего напряжения T_x в двух направлениях (слева направо и справа налево) происходит продавливание такими блоками более слабых, и как результат в разломных зонах формируются растягивающие напряжения, что и наблюдается на рис. 3.

Формирование главных напряжений σ_2 (см. рис. 4) преимущественно происходит вдоль разломов и границ блоков, идущих слева направо. Концентраторами этого напряжения являются места пересечений разломных зон и границ блоков, а также концы разломов. В отличие от значений σ_1 значения σ_2 не принимают положительных величин, то есть отсутствуют растягивающие усилия. Это объясняется тем, что действие горизонтального сжимающего напряжения T_y направлено вдоль Саамского разлома и блока разломных зон VI, что минимизирует образование в них растягивающих напряжений. Также этому способствует конфигурация чередующихся блоков вмещающих пород и рудного тела, в которой разломы (блоки II и VI) выступают в роли демпфера и среды для переноса энергии между блоками.

На следующем этапе исследовали непосредственно влияния обводненного состояния разломов на распределение значений главных напряжений σ_1 и σ_2 и энергонасыщенное состояние расчетной модели иерархично-блочной среды. Для этого значение модуля упругости блоков разломных зон первой модели было уменьшено на 25 %, а коэффициента Пуассона – увеличено на 22 % согласно [4]: $E_{\text{раз}}=1,97 \cdot 10^4$ МПа и $\nu_{\text{раз}}=0,39$. Значения для остальных блоков и их конфигурация остались такими же, как и для условий первой модели.

Распределение значений главных напряжений, полученных для условий второй модели с учетом обводненного состояния блоков разломных зон, представлено на рис. 5 и 6.

В целом для второй модели картина формирования напряжений (рис. 5, 6) соответствует той, что была получена для условий первой модели (см. рис. 3, 4). Значения σ_1 оказались почти одинаковыми, а σ_2 – ненамного выше для второй модели. Главным отличием стало отсутствие растягивающих напряжений σ_1 в месте пересечения блока II с Саамским разломом (вторая модель). При этом остальные зоны растяжения сохранились, а в блоках III и IV такая зона стала более локализованной. Объяснением этому является увеличение пластичности разломов, которое приводит к уменьшению концентрации напряжений возле них и частичному (или полному) снятию растягивающих усилий.

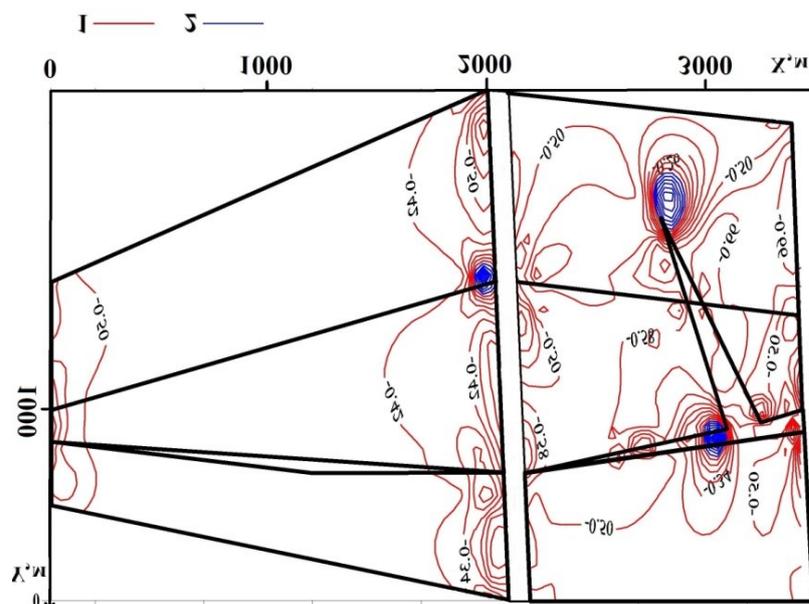


Рис. 5 – Распределение значений главных напряжений σ_1 (вторая модель):
1 – сжимающие напряжения, 2 – растягивающие напряжения

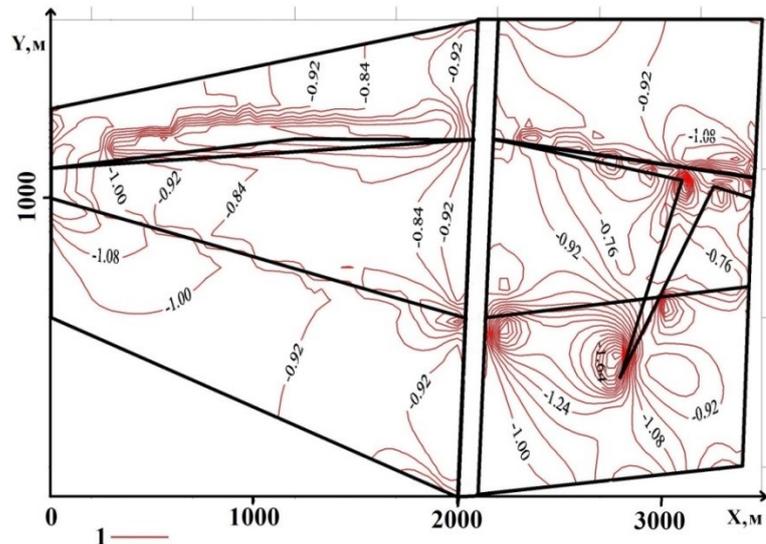


Рис. 6 – Распределение значений главных напряжений σ_2 (вторая модель):
1 – сжимающие напряжения

На основании результатов моделирования напряженного состояния блоков исследуемых моделей проведены расчеты значений относительной, абсолютной и удельной энергий деформирования этих блоков. Расчеты выполнены в соответствии с формулами (1), (2) и (3), представленными в [2]:

$$w_{\text{отн}} = \iiint (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\nu\sigma_1\sigma_2) dx dy dz, \quad (1)$$

$$w_{\text{абс}} = \frac{1}{2E} w_{\text{отн}} T_x^2, \quad (2)$$

$$w_{\text{уд}} = \frac{w_{\text{абс}}}{V_{\text{блока}}} \Delta x \Delta y \Delta z, \quad (3)$$

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения; E – модуль упругости исследуемого блока, МПа; ν – коэффициент Пуассона исследуемого блока; T_x – горизонтальное сжимающее напряжение, МПа; $V_{\text{блока}}$ – объем исследуемого блока, м^3 ; Δx , Δy , Δz – приращения расстояний между точками в блоках, равные, соответственно, 100, 100 и 1 м.

Полученные в ходе испытаний образцов апатит-нефелиновой руды и уртита среднезернистого массивного данные, а также данные из справочника кадастра физических свойств [5] позволили определить критические значения удельной энергии деформирования (для вмещающих пород – $2,10\text{E}+05$ Дж/м³, для рудного тела – $1,60\text{E}+05$ Дж/м³, для разломной зоны – $5,56\text{E}+04$ Дж/м³, для мончекитовых даек – $4,64\text{E}+05$ Дж/м³) по следующей формуле:

$$w_{\text{крит}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}^2}{2E}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на одноосное сжатие, МПа.

На основании результатов численного моделирования распределения главных напряжений σ_1 и σ_2 для условий первой и второй моделей были проведены расчеты удельной энергии деформирования блоков (рис. 7, 8).

В ходе анализа значений удельной энергии деформирования блоков первой (см. рис. 7) и второй (см. рис. 8) моделей установлено, что основные изменения произошли в блоках разломных зон II и VI – для последней они увеличились, соответственно, на 18 и 4 % (разница $1,23\text{E}+05$ и $2,61\text{E}+04$ Дж/м³). Для остальных блоков разница была не столь существенна (меньше 10 % или $0,80\text{E}+04$ Дж/м³). При этом уменьшение значений наблюдалось для рудного тела (блоки VII и VIII), тогда как для вмещающих пород

значения как увеличились (блок V), так и уменьшились (блоки I и IX). Следовательно, можно сделать вывод о том, что наличие обводненного разлома, разделяющего массив горных пород на блоки, приводит к снижению их удельной энергии деформирования, однако энергия самих разломов в таком случае значительно возрастает.

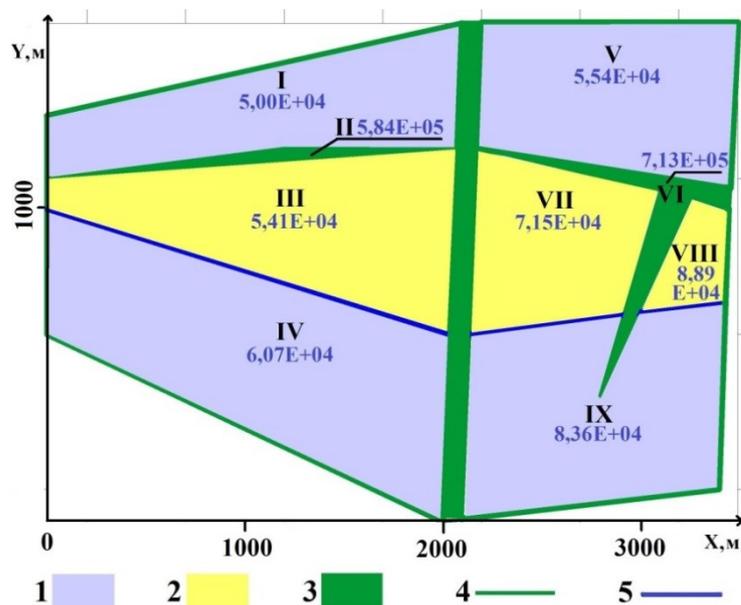


Рис. 7 – Значения удельной энергии деформирования блоков первой модели (Дж/м³):
1 – вмещающие породы; 2 – рудное тело; 3 – разломная зона; 4 – граница блоков, представленная разломами; 5 – граница блоков, имеющих разные физические свойства; римские цифры – номера блоков

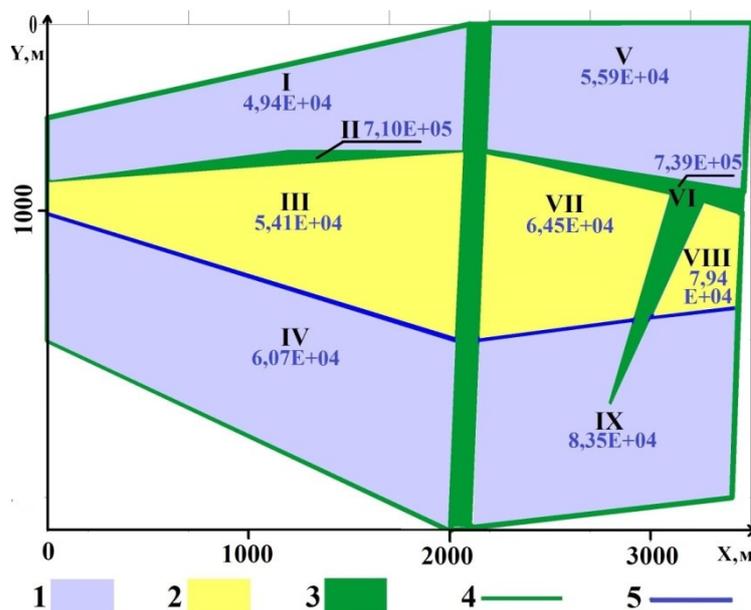


Рис. 8 – Значения удельной энергии деформирования блоков второй модели (Дж/м³):
1 – вмещающие породы; 2 – рудное тело; 3 – разломная зона; 4 – граница блоков, представленная разломами; 5 – граница блоков, имеющих разные физические свойства; римские цифры – номера блоков

Тем не менее влияние разломов в обводненном состоянии на энергонасыщенность окружающего массива (вмещающих пород) не может быть оценено однозначно исходя из результатов, рассчитанных для условий первой и второй моделей, поскольку измене-

ние их значений произошло в пределах допустимой погрешности. При сравнении энергетического состояния правых частей (блоки V-IX, $1,04E+05$ и $1,28E+05$ Дж/м³) и левых частей (блоки I-IV, $6,50E+04$ и $6,70E+04$ Дж/м³) первой и второй моделями установлено, что обводненность в целом привела к увеличению энергонасыщенности второй модели, особенно для правой ее части и для разлома левой. Исходя из полученных данных для первой модели (см. рис. 3, 4), блок разломных зон II находится в менее напряженном состоянии (энергонасыщенном) (см. рис. 7), чем блок VI. Сравнив рис. 5 и 6, можно заметить, что напряжения в блоке II возросли и стали численно равны тем, что были рассчитаны для блока VI. На основании этого можно сделать вывод, что обводненность также в большей степени увеличивает напряженное и энергонасыщенное состояния тех блоков, которые до этого были менее напряжены и энергонасыщены, что и является, вероятно, причиной повышения значений удельной энергии деформирования левой и правой частей второй модели.

Если проводить сравнение рассмотренных моделей, то наибольшее значение удельной энергии деформирования их частей соответствует второй модели с разломами в обводненном состоянии (левая и правая части – $6,70E+04$ и $1,28E+05$ Дж/м³, соответственно), меньшие значения установлены для условий первой модели с разломными зонами ($6,50E+04$ и $1,04E+05$ Дж/м³).

При сопоставлении критических величин удельной энергии деформирования с расчетными для блоков первой и второй моделей видно, что блоки разломной зоны находятся в предельном состоянии. При этом их удельная энергия на порядок больше критической. Следовательно, именно вблизи разломов, в особенности обводненных, возможны проявления динамических видов горного давления при ведении горных работ.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных исследований энергонасыщенного состояния иерархично-блочной среды на примере Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений методом численного моделирования было установлено, что для моделей (вид сверху) при действии двух горизонтальных сжимающих напряжений ($T_x=50$ МПа и $T_y=25$ МПа)

– наличие обводненного разлома, разделяющего массив горных пород на блоки, приводит к снижению их удельной энергии деформирования, однако энергия самих разломов в таком случае возрастает (уменьшение и увеличение удельной энергии деформирования происходит в пределах одного порядка);

– обводненность в большей степени увеличивает напряженное и энергонасыщенное состояние тех блоков, которые в сухом состоянии были менее напряжены и энергонасыщены.

Автор выражает свою благодарность д.т.н. С.Н. Савченко и к.т.н. Ю.В. Федотовой за помощь в разработке моделей, ценные советы и обсуждение результатов исследований.

Литература

1. Кузнецов Н.Н. Оценка энергонасыщенного состояния иерархично-блочной среды (на примере Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений) / Н.Н. Кузнецов, Ю.В. Федотова // XVII Межрегиональная научно-практическая конференция. Ч. 1: тезисы докладов, Кольский филиал Петрозаводского государственного университета. – Апатиты: Изд. КФ ПетрГУ, 2014. – С. 36 - 37.

2. Савченко С.Н. Энергетический аспект устойчивости горных пород / С.Н. Савченко // Деформационное разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: сб. науч. тр. – Крым, Алушта, Симферополь: Таврический нац. ун-т им. В.И. Вернадского, 2010. – С. 296 - 299.



3. Савченко С.Н. Энергетический критерий разрушения горных пород / С.Н. Савченко // Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. – С. 213 – 222.

4. Сукнев С.В. Методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона при изменении температуры образца / С.В. Сукнев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. - № 8.– С. 101-105.

5. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1975.