

- проницаемости, используя определения (или предположения о значении) модуля Юнга и поверхностной энергии:
- оценку модуля Юнга, используя определения (или предположения о значении) проницаемости и поверхностной энергии.

### Список литературы

1. Вернадский В.И. Очерки геохимии. М.: Наука, 1983. 422 с.
2. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Флюидная проницаемость пород Земной коры. М.: Научный Мир, 2002. 216 с.
3. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966, 279 с.
4. Семашко С.В. Микротрещиноватость и геодинамическая энергия. Изв. ТулГУ. Геоинформационные технологии в решении региональных проблем. 2005. Вып. 2. 212 с.

*S.V. Semashko*

#### *EVALUATING PERMEABILITY AND YOUNG MODULUS AT POOR-POROUS CRYSTAL ROCKS OF FOUNDATION*

*Relations between permeability, surface energy and Young modulus of rocks were ascertained. These relations show, that Young modulus is proportional to surface energy and inversely proportional to square root from rock permeability.*

*Key words: water, water solution, crystal rock, permeability, surface energy, Young modulus.*

Получено 24.11.11

УДК 624.131.431.2

С.В. Семашко, канд. геол.-минер. наук, доц., (4872) 35-20-41  
(Россия, Тула, ТулГУ)

### СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ФЛЮИДОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

*Установлено, что в частях земной коры континентального типа, задействованных в метасоматических и метаморфических процессах, значения модуля Юнга уменьшаются в несколько раз (от 2,4 до 7,8), по сравнению с незадействованными в этих процессах частями земной коры.*

*Ключевые слова: флюиды, пористость, проницаемость, вертикальная составляющая скорости фильтрации, зоны повышенной проницаемости, сейсмические исследования, добротность, модуль Юнга, очаговая зона землетрясения, вмещающие породы, метасоматические и метаморфические процессы, изменения модуля Юнга.*

Современные представления о наличии и движении флюидов в глубинных частях земной коры были сформированы под влиянием результатов, полученных при изучении:

- гидротермальных и метаморфических систем;
- флюидов при высоких термодинамических параметрах;
- емкостно-фильтрационных свойств горных пород в условиях высоких температур и давлений;
- физико-механических, физико-химических и химических взаимодействий горных пород и флюидов в условиях высоких температур и давлений.

В соответствии с этими представлениями одно из основных условий движения флюидов в глубинных зонах – наличие проницаемости горных пород. Значения проницаемости пород, необходимые для движения глубинных флюидов, устанавливают на основе теоретических и экспериментальных исследований, учитывающих воздействие определенного набора природных факторов. Наиболее значимыми факторами, влияющими на пористость и проницаемость, признаются комплексное воздействие температур и давлений, физико-механические характеристики горных пород, а также распределение и количественные характеристики трещин и микротрещин.

При исследованиях, проведенных в лабораторных условиях, установлено, что определение результирующего воздействия всех перечисленных выше факторов на величину проницаемости не может быть получено простым суммированием последствий воздействий каждого фактора в отдельности. Необходимость учета влияния реальной геологической среды, с одной стороны, значительно увеличивает объем лабораторных исследований, а с другой - затрудняет перенос полученных значений проницаемости на породы глубинных частей земной коры. Для привязки «лабораторных» значений проницаемости к исследуемым интервалам глубин оказывается необходимым поинтервальное определение термодинамического состояния, физико-механических характеристик и характеристик трещиноватости, что на современном аппаратурно-методическом уровне глубинных исследований, без наблюдений «in situ», крайне затруднено.

Результаты исследований глубоких и сверхглубоких скважин подтвердили правомочность представлений о наличии проницаемых интервалов в кристаллических породах фундамента как минимум до глубины 12 км. Всестороннее изучение этих интервалов не оставило ни малейших сомнений в «активной жизни» земных недр, проявляющейся в перемещениях флюидов, современном образовании минералов и тектонических процессах.

Проводка Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) позволила получить значительный объем достоверной информации о вещественном составе, термобарическом состоянии, степени насыщенности газами и флюи-

дами зон повышенной проницаемости в земной коре континентального типа. При проводке СГ-3 по результатам исследований бурового раствора на разных глубинах были зафиксированы водопритоки различной интенсивности, аномальные содержания гелия и других, в том числе и углеводородных, газов [1]. В образцах керна, поднятых с разных глубин, отмечено наличие микротрещин, низкотемпературных минералов, проявлений процессов катаклаза. Изучение одной из самых представительных групп пород архейской части разреза, вскрытых СГ-3 на глубинах более 6,8 км, – гнейсов показало, «что эти породы, как правило, являются тектонитами – катаклазитами и буквально пронизаны зонами дробления, скалывания и рассланцевания...». В этих зонах наблюдаются признаки интенсивного дробления, истирания и метасоматического развития вторичных низкотемпературных минералов типа биотита, мусковита, эпидота, хлорита, сульфидов и др. » [2]. В процитированной работе также отмечается, что зоны разуплотнения и частичного разрушения пород « ... обычно характеризуются длительным периодом развития...». Этот фактический материал следует рассматривать как прямое доказательство существования в настоящее время зон повышенной проницаемости в земной коре континентального типа, по крайней мере, до глубины 12 км.

Ограниченный вынос керна из архейской части разреза СГ-3 (в среднем около 20 %) определил ориентацию на использование методов геофизических исследований скважин (ГИС) для определения количественных характеристик зон повышенной проницаемости. На основе комплекса акустических и геотермических исследований были разработаны методики оценки емкостно-фильтрационных свойств для кристаллических пород с низкими значениями пористости [3]. Использование этих методик позволило провести оценку пористости и проницаемости архейской части разреза, вскрытого СГ-3. Среднее значение пористости для архейской части разреза 1,3 %. Фоновая проницаемость оценивается значениями  $n \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ , а в зонах повышенной проницаемости – до  $n \cdot 10^3 (10^4) \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ .

Полученные оценки хорошо согласуются с оценками пористости и проницаемости для образцов пород из керна СГ-3 при термобарических условиях, соответствующих местам отбора керна [4]. В этой же работе, на основе анализа полученных значений проницаемости и данных об исследовании гидротермальных систем, сделан вывод о «возможности циркуляции гидротермальных растворов в районе заложения СГ-3 вплоть до глубин 8...10 км».

Эксперимент по определению проницаемости кристаллических пород фундамента непосредственно в стволе скважины (in situ) был проведен в сверхглубокой скважине КТБ (Германия, Оберфальц). Измеренные значения проницаемости находятся в пределах  $(1-10) \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$  [5]. Эти значения хорошо согласуются с результатами определений проницаемости с использованием материалов ГИС, проведенных в стволе СГ-3, и на об-

разцах керна (при термобарических условиях, соответствующих исследуемым глубинам).

Оценки скорости фильтрации флюидов в разрезе СГ-3 получены на основе интерпретации результатов геотермических исследований и изучения тепловых свойств kernового материала. Наиболее достоверные оценки фоновых значений вертикальной составляющей скорости фильтрации находятся в интервале 2...5 мм/год. В исследованном разрезе были встречены интервалы и с более высокими скоростями движения флюидов. В качестве примера можно привести скорости – 10...30 мм/год, которые были определены для интервала глубин 10 220...10 320 м. В зонах повышенной проницаемости эта скорость может достигать 60 мм/год. В отдельных случаях зафиксированы значения до 170 мм/год (в интервале глубин 7 450...7 550 м) [3]. Это максимальное значение скорости фильтрации, определенное в породах архейского комплекса. Отметим, что значение градиента давления, вызывающего эту фильтрацию, оценивается величиной  $\approx 2 \cdot 10^3$  Па/м, т.е. движение флюида происходит под действием градиента давления, значение которого в пять раз меньше, чем градиент гидростатического давления ( $10 \cdot 10^3$  Па/м).

Оценки вертикальной составляющей скорости движения флюидов ( $V_\phi$ ) Е.А. Любимовой [6] в районе заложения СГ-3 (Печенгский комплекс, глубина скважин в пределах 1 км, в зоне экзогенной трещиноватости) равны 40 мм/год. По оценкам Ю.А. Попова [7] интегральное значение  $V_\phi$  на глубине 2,8 км – около 2,6 мм/год.

В результате наших определений для архейской части разреза в интервале глубин 9 100...9 750 м получены значения 2...5 мм/год, которые можно рассматривать как фоновые, или минимальные значения вертикальной составляющей движения флюидов в исследуемой части разреза. Совпадение средних скоростей движения флюидов в непрерывном разрезе, который состоит из разновозрастных и имеющих разный литологический состав породных комплексов, представляется не случайным. Это совпадение, может быть рассмотрено как следствие действия единого механизма, который и обеспечивает «фоновое» движение флюидов во всем исследованном интервале глубин.

Предположив, что в районе заложения Кольской сверхглубокой скважины фильтрация флюидов идет под действием гидростатического градиента давления ( $10 \cdot 10^3$  Па/м), а определенное среднее значение проницаемости ( $k$ ) равно  $5 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup>, получим усредненное значение  $V_\phi$  около 6 мм/год. Отметим, что это значение примерно соответствует средней скорости подъема Феноскандии.

Полученные оценки  $V_\phi$  - от (2...5) до 6 мм/год служат весомым аргументом при обосновании предположения, в соответствии с которым до глубин 10 км в кристаллических породах Балтийского щита движение

флюидов может происходить и под действием гидростатического градиента давления.

Следовательно, в исследованном разрезе земной коры континентального типа до глубины 10 км движение флюидов может происходить под действием градиентов давлений в интервале от  $2 \cdot 10^3$  до  $10 \cdot 10^3$  Па/м.

Существование зон повышенной проницаемости создает благоприятные условия для развития ряда процессов, приводящих к образованию рудных месторождений, поскольку обеспечивает связь разноглубинных частей земной коры с мантийными и коровыми источниками рудных компонентов. Известно, что перемещение флюидов является необходимым условием при формировании месторождений гидротермально-метаморфического генезиса в различных частях коры. Так, например, в архейской части разреза СГ-3 повышенные значения общего содержания серы ( $>0,15\%$ ), в 85 % случаев концентрируются в зонах повышенной проницаемости [8]. С этими же зонами на глубинах около 10 км связано и проявление золоторудной минерализации, предположительно гидротермального генезиса.

Как показали результаты исследований вариаций изотопного состава петрогенных элементов из образцов керна СГ-3 (В.Д. Нарतिकоев, 1992 г.), в зоне повышенной проницаемости – интервал глубин 9,5...10,6 км – происходит изменение величины изотопных отношений некоторых петрогенных элементов. Так, например, если отношение изотопов магния  $^{24}\text{Mg}/^{25}\text{Mg}$  имеет фоновое значение для исследуемого разреза в пределах 6...7, то в зоне повышенной проницаемости – 8,5. Отношение изотопов  $^{25}\text{Mg}/^{26}\text{Mg}$  – 0,1 фоновое и 0,8 в зоне повышенной проницаемости. Для изотопов железа отношение  $^{54}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$  соответственно 2,1...2,5 – фоновые, и 3,2 – в зоне повышенной проницаемости. Отношение изотопов кислорода  $^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$  имеют фоновые значения 2,6...2,8, а в зоне повышенной проницаемости – 2,0...2,2.

Результаты этих исследований можно рассматривать как доказательство глубокой степени (на уровне изотопов) переработки вещественного состава горных пород (составляющих их минералов) в зонах повышенной проницаемости.

Изучение глубинного строения земной коры континентального типа в значительной мере основывается на интерпретации сейсмических исследований. Геологическая интерпретация материалов этих исследований базируется на определении природы сейсмических отражающих площадок и горизонтов. Традиционно пространственное положение этих площадок и горизонтов связывают со стратиграфическими границами в исследуемых разрезах, а особенности их вещественного состава определяют, исходя из кинематических характеристик сейсмических волн определенных для рассматриваемых участков земной коры. Подчиненное значение, как правило, при объяснении геологической природы сейсмических границ имеют тек-

тонический фактор и напряженное состояние исследуемого массива. Влиянию вариаций распределения микротрещиноватости в исследуемых массивах на формирование отражающих границ не придается до настоящего времени должного значения. Отметим, что оценка авторов изменение величины пористости (за счет микротрещин) в диапазоне значений 0,02...2 % на величину 0,2 % вызывает изменение коэффициента отражения на величину 0,05 .

Следовательно, при достаточной мощности соседствующих интервалов с различным содержанием микротрещин, возможно выделение этих интервалов с помощью наземных и скважинных сейсмических исследований.

Анализ распределения проявлений тектонических процессов в разрезе СГ-3, пористости (обусловленной в основном наличием микротрещин), зон повышенной проницаемости позволяет определить основной механизм формирования зон повышенной проницаемости как тектонический. Отражение этих зон на сейсмических материалах хорошо иллюстрируют результаты изучения разреза СГ-3 и района ее заложения различными сейсмическими методами. Так, например, Лучломпольский разлом (вскрытый скважиной на глубине 4500 м) прекрасно выделяется при следующих видах сейсмических работ: методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), методом обменных волн (МОВ), методом обменных волн от землетрясений (МОВЗ), методом разведочной сейсмологии (МРС), методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП) [1].

В архейской части разреза к большей части интервалов формирования волновых пакетов (выделенных при интерпретации материалов ВСП М.Д. Лизинским и В.Н. Шопиным, 1986 г.) приурочены и зоны повышенной проницаемости. В интервале 9 000...10 600 м наблюдается совпадение интервалов формирования волновых пакетов (ВСП) и отражающих площадок выделенных при интерпретации ГСЗ, МОВ и МОВЗ [8]. Скоростные характеристики ( $V_p = 6,0...6,1$  км/с,  $V_s = 3,6...3,7$  км/с), размеры и ориентация отражающих площадок в этом интервале глубин примерно такие же, как и в интервале глубин 8...11 км, определенные на геотраверсе Мурманск – Кызыл в Западно-Кольском блоке (Н.Е. Галдин, 1993 г.).

Следовательно, эта зона повышенной проницаемости, выделенная по результатам комплексных сейсмических исследований в разрезе СГ-3 и в районе ее заложения, имеет региональное значение и может рассматриваться как зона повышенной проницаемости регионального масштаба.

До настоящего времени определение роли флюидов при тектонических движениях и подготовке землетрясений остается одним из основных направлений изучения геодинамических процессов в земной коре и верхней мантии. В результате комплексных исследований на геодинамических полигонах во второй половине XX века установлено, что разломы земной коры могут интенсивно поглощать флюиды, особенно при активизации

движений (подвижках) в пределах разломов или разломных зон. Помимо этого, имеются экспериментальные данные, свидетельствующие, что внезапный подъем флюидов в разломных зонах провоцирует (инициирует) землетрясение [9]. Важность изучения динамики подземных вод подчеркивается и при определении информативности различных геофизических, геохимических, гидрогеологических и деформационных методов исследований, используемых для целей прогноза землетрясений. В результате исследований установлено, что «наибольшей прогностической информацией обладают ... объемная деформация горных пород или уровень подземных вод, прямо отражающие деформационные процессы в земной коре» [10]. Предложено несколько моделей возможной взаимосвязи миграции флюидов и сейсмического режима. Наиболее известные представления о механизмах, обеспечивающих эту взаимосвязь, сформулированы такими исследователями, как Miller (1996), Henderson (1997), Yamashita (1997); обзор работ указанных авторов представлен в монографии [9].

Отметим, что до настоящего времени предметом дискуссий остаются не только источники и механизмы движения флюидов, но и численные значения фильтрационно-емкостных характеристик горных пород очаговых зон землетрясений и вмещающих их пород. Отсутствие достоверной информации объясняется невозможностью изучения движения флюидов в пределах очаговых зон с помощью прямых методов наблюдений. Поэтому качественная и количественная оценка фильтрационно-емкостных характеристик на этих глубинах основывается на результатах интерпретации глубинных сейсмических методов и электромагнитных зондирований.

Результаты исследований района Суматринского землетрясения (26.12.2004 г.), представленные в работах [11, 12, 13], формируют необходимую информационную базу для количественных оценок модуля Юнга, пористости и проницаемости горных пород. На этой основе нами получены численные оценки перечисленных выше характеристик пород очаговой зоны землетрясения и вмещающих пород, которые позволяют:

- определить пределы изменения модуля Юнга, пористости и проницаемости в глубинных частях земной коры и верхней мантии на участке подготовки сильного землетрясения;

- провести сопоставление проницаемости очаговой зоны сильного землетрясения и вмещающих ее пород и сравнить с результатами исследований проницаемости метасоматических и метаморфических систем континентальной Земной коры.

Суматринское землетрясение произошло западнее о.Суматра на фланге Зондской сейсмической области. Его магнитуда составила  $M_w = 9,3$ , а глубина очага – около 30 км. Это землетрясение «...является первым землетрясением с магнитудой более 9, произошедшим в эпоху цифровых сейсмических наблюдений» [11, 12]. При исследовании напряженного со-

стояния пород района землетрясения получены количественные оценки следующих параметров [11, 12]:

- горизонтального напряжения на глубине 30 км, достигающего  $(9...12) \cdot 10^2$  МПа;
- максимальных касательных напряжений, достигающих 30...35 МПа;
- изменений отношения эффективного всестороннего давления к касательному напряжению, находящихся в диапазоне от 0,87 до 2,10.

В работе [13] приведены результаты картирования поля поглощения  $S$  – волн (по значениям эффективной добротности  $Q_s$ ) в южной части очаговой зоны Суматринского землетрясения. Полученные значения добротности разделены на три интервала:

I интервал –  $Q_s = 150...220$  – соответствует повышенному поглощению сейсмических волн;

II интервал –  $Q_s = 230...330$  – соответствует промежуточному поглощению сейсмических волн;

III интервал –  $Q_s = 370...1000$  – соответствует пониженному поглощению сейсмических волн.

На площади исследования выделены две линейные зоны сильного поглощения волн, имеющие северо-западное и северо-восточное простирание. Эпицентр Суматринского землетрясения находится в области пересечения этих зон. Отметим, что очаг землетрясения расположен между глубоководным желобом и вулканической областью.

При переходе от значений добротности к количественной оценке пористости воспользуемся соотношением [14]

$$f = 47,1 \cdot \left( \frac{1}{Q_s} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где  $f$  – пористость;  $Q_s$  – добротность.

Для количественной оценки модуля Юнга воспользуемся соотношением [7]

$$\sigma = f \cdot E / [3(1 - 2\nu)], \quad (2)$$

где  $\sigma$  – эффективное всестороннее давление;  $f$  – пористость;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Из соотношения (2) следует, что

$$E = \sigma [3(1 - 2\nu)] / f. \quad (3)$$

Количественную оценку проницаемости проведем, используя выведенное ранее [7] соотношение

$$K = 65,6 \cdot (T / E)^2, \quad (4)$$

где  $K$  – проницаемость;  $T$  – удельная поверхностная энергия;  $E$  – модуль Юнга.



После подстановки (3) в (4) имеем

$$K = 7,3 \cdot \left\{ f \cdot T / [\sigma(1 - 2\nu)] \right\}^2, \quad (5)$$

В соответствии с расчетами, выполненными с использованием результатов определения максимальных касательных напряжений (30...35 МПа) и отношения эффективного всестороннего давления к касательному напряжению (0,87...2,10), представленных в работах [11, 12], изменения эффективного всестороннего давления находятся в пределах 26...74 МПа. Для количественных оценок проницаемости примем значение коэффициента Пуассона равным 0,25, а значение удельной поверхностной энергии – 1 Дж/м<sup>2</sup> [16].

Оценки модуля Юнга, пористости и проницаемости очаговой зоны Суматринского землетрясения и вмещающих ее пород, получены с использованием соотношений (1), (3), (5) и представлены в табл. 1.

Полученные значения проницаемости очаговой зоны и вмещающих ее пород сопоставим с оценками проницаемости континентальной земной коры, которые получены на основе данных о тепловых потоках и анализа метасоматических и метаморфических систем и соответствуют интервалу глубин 15...40 км [4]. В соответствие с этими оценками, проницаемость пород континентальной земной коры изменяется следующим образом:

- 1) при метасоматических процессах в зонах пластического течения пород – от  $6,3 \cdot 10^{-18}$  до  $7,9 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup>;
- 2) при процессах контактового метаморфизма – от  $1,0 \cdot 10^{-18}$  до  $4 \cdot 10^{-17}$  м<sup>2</sup>;
- 3) при процессах регионального метаморфизма – от  $1,8 \cdot 10^{-21}$  до  $3,55 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup>.

**Таблица 1**

**Оценки модуля Юнга, пористости и проницаемости**

$Q_s$	f %	$E \cdot 10^9$ , Па	K, м <sup>2</sup>	Примечание
150...220	1,29...1,67	2,34...8,55	$9,0 \cdot 10^{-19}$ ... $1,2 \cdot 10^{-17}$	Очаговая зона
230...330	0,99...1,25	3,13...11,1	$5,3 \cdot 10^{-19}$ ... $6,7 \cdot 10^{-18}$	Очаговая зона – вулканическая область
370...600	0,66...0,91	5,93...23,5	$1,2 \cdot 10^{-19}$ ... $1,3 \cdot 10^{-18}$	Очаговая зона – глубоководный желоб

Полученные авторами значения проницаемость очаговой зоны и вмещающих ее пород изменяется в пределах двух порядков: от  $1,2 \cdot 10^{-19}$  до  $1,2 \cdot 10^{-17}$  м<sup>2</sup>. Эти значения на пять-семь порядков превышают нижний порог проницаемости, равный  $10^{-24}$  м<sup>2</sup>.

Следовательно, во всем объеме горных пород, который задействован в подготовке Суматринского землетрясения, существует возможность перемещения флюидов.

Отметим, что полученные авторами значения проницаемости для очаговой зоны ( $9,0 \cdot 10^{-19} \dots 1,2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ ) частично попадают в интервал значений проницаемости, характерный для метасоматических процессов в зонах пластического течения пород и для процессов контактового метаморфизма. Проницаемость пород, расположенных юго-восточнее очаговой зоны (в направлении глубоководного желоба), изменяется в пределах  $1,2 \cdot 10^{-19} \dots 1,3 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ ; проницаемость пород, расположенных северо-восточнее очаговой зоны (в направлении вулканической области), изменяется в пределах  $5,3 \cdot 10^{-19} \dots 6,7 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ .

Проницаемость пород, вмещающих очаговую зону, соответствует наиболее высоким значениям показателя для процессов регионального метаморфизма и находится в пределах значений, характерных для контактового метаморфизма. Максимальные значения проницаемости ( $6,7 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ ) пород, расположенных юго-восточнее очаговой зоны, находятся вблизи нижней границы проницаемости ( $6,3 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ ) при метасоматических процессах в зонах пластического течения пород.

Повышение значений проницаемости и пористости, понижение значений модуля Юнга в вулканической области по сравнению с участком земной коры, прилегающим к глубоководному желобу, представляются не случайными. Известно, что прочностные характеристики горных пород меняются в широких пределах в зависимости от термобарических условий, в которых они находятся, а также от насыщенности флюидами. Поэтому одним из наиболее вероятных объяснений отмеченных выше различий может быть большее влияние флюидов на физико-механические и емкостно-фильтрационные характеристики пород нижней части земной коры и верхней мантии района вулканической области по сравнению с глубинными породами участков прилегающих к океаническому желобу.

Пористость пород очаговой зоны, согласно оценке авторов, находится в интервале 1,29...1,67 %. Эти значения превышают средние оценки пористости:

- гранулит-базитовой оболочки континентальной и субконтинентальной коры - 0,72 % [17];
- земной коры в интервале глубин 20...38 км – 1,0 % [6].

Следовательно, полученные оценки пористости и проницаемости позволяют охарактеризовать очаговую зону Суматринского землетрясения как область с повышенными по отношению к вмещающим породам значениями пористости (в 1,5...2 раза) и значениями проницаемости (на один - два порядка).

Экспериментальные и теоретические исследования выявили ведущую роль воды в формировании состава и свойств глубинных флюидов и

их влияния на вмещающие горные породы: «... по доминированию (в среднем) в общем составе глубинных флюидов и, в особенности, по характеру связи с температурой плавления горных пород с их реологическими свойствами, водный флюид представляется наиболее важным компонентом природных глубинных флюидов» [19].

Несмотря на значительное количество теоретических и экспериментальных исследований, определение предельных глубин существования воды в литосфере было и остается предметом дискуссий. Это связано, в первую очередь, с тем, что возможность существования воды в недрах нашей планеты на тех, или иных глубинах зависит от совокупности и количественных характеристик ряда факторов, в число которых входят:

- вид воды (свободная, физически или химически связанная);
- минерализация вод (пресные и минерализованные воды, рассолы);
- вещественный состав и характеристики пустотного пространства горных пород;
- температура и давление горных пород и вод;
- тип пустотного пространства горных пород.

Гипотетичность современных представлений о вещественном составе и термодинамическом состоянии земных недр определяет и избыточно широкий (с нашей точки зрения) интервал изменений оценок предельных глубин подземной гидросферы: от 4...5 до первых сотен километров.

На современном уровне знаний наиболее общепринятым считается предположение, в соответствии с которым образование основной массы наземной и подземной гидросфер обусловлено процессами дегазации верхней мантии и выделением вод из магматических расплавов при их подъеме к земной поверхности [19]. Поэтому за нижнюю границу существования водных флюидов и, следовательно, подземной гидросферы наиболее часто принимают нижнюю границу верхней мантии.

Значимость принятия той или иной нижней границы распространения водных флюидов в литосфере объясняется тем, что при этом появляется возможность определить интервал изменений температур и давлений, при которых возможно существование флюидов и, следовательно, выявить особенности их взаимодействия с вмещающими горными породами. Результаты этих взаимодействий, в свою очередь, в значительной мере определяют интервалы изменений ряда физико-механических и прочностных характеристик глубинных зон. Известно, что флюиды, будучи самой подвижной и достаточно энергоемкой составляющей литосферы, являются активными участниками переноса и трансформации потоков вещества и энергии.

Следовательно, при изучении современных геодинамических процессов и их эволюционной направленности, определение мест локализации

и перемещения флюидов необходимо отнести к одним из основных видов исследований земной коры и верхней мантии.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что в литосфере в качестве наиболее вероятных мест нахождения водных флюидов признаются зоны повышенного поглощения сейсмических волн и сейсмические волноводы. В настоящее время заключение о наличии флюидных систем на глубинах более 4...5 км. в земной коре континентального типа признается наиболее обоснованным, если оно основывается на результатах комплексной интерпретации сейсмических и геоэлектрических методов.

Отметим, что в земной коре и верхней мантии практически повсеместно выделяют сейсмические волноводы, электропроводящие зоны и участки повышенного поглощения сейсмических волн. Наличие пространственных совпадений (пересечений, перекрытий) перечисленных выше волноводов, электропроводящих зон и участков, или их частей, может рассматриваться и как доказательство реальности существования связанных между собой флюидных включений в значительных объемах литосферы.

Существование глубинных, водных флюидов в кристаллических породах фундамента на глубинах до 12 км подтверждено результатами исследований керна глубоких и сверхглубоких скважин. При изучении керна Кольской сверхглубокой также установлено, что в нижней части разреза средний уровень концентраций поровых растворов возрастает с глубиной в два – три раза и «.. наблюдается отчетливая связь величины концентрации элементов в поровых растворах с пористостью и прочностью пород. При этом содержание элементов растет в интервалах, где пористость повышается, а прочность понижается» [18]. Отметим, что такое поведение прочностных характеристик свойственно водонасыщенным кристаллическим породам, независимо от того, в каких термобарических условиях они находятся. Экспериментально установлено, что наиболее явно уменьшение прочностных и деформационных характеристик горных пород при насыщении их водой (водными флюидами) проявляется при значениях пористости около одного процента [19].

Выявленные связи пористости, прочностных и деформационных характеристик и водонасыщенности горных пород позволяют вполне обоснованно полагать, что уменьшение их прочностных и деформационных свойств обусловлено именно присутствием водных флюидов.

Следовательно, присутствие или отсутствие водных растворов, пористость и проницаемость горных пород можно уверенно отнести к числу тех факторов, которые определяют прочностные и деформационные характеристики глубинных зон земной коры.

При этом крайне важным, с нашей точки зрения, является то, что в результате анализа значений пористости и проницаемости могут быть сде-

ланы выводы о существовании, или отсутствии систем связанных между собой трещин, или микротрещин и их параметрах. Наличие трещин и микротрещин и их параметры, как известно, в значительной степени и определяют не только проницаемость, но и значения прочностных и деформационных характеристик исследуемых массивов горных пород.

Отметим, что во второй половине XX века на основе исследований проницаемости горных пород были созданы реометрические методы определения местонахождения ослабленных зон (зон с пониженными значениями прочностных характеристик) в стенках горных выработок. Исследования свойств массива с помощью реометрических методов успешно применялись на горнорудных предприятиях Кольского полуострова и Северной Карелии [20].

Экспериментальные определения проницаемости в условиях высоких давлений и температур, проводимые как на образцах горных пород, так и непосредственно в глубоких и сверхглубоких скважинах, относятся к одним из самых трудоемких исследований горных пород. В настоящее время наиболее обоснованные оценки проницаемости пород континентальной земной коры до границы Мохо проведены на основе:

а) экспериментальных определений проницаемости на образцах горных пород в отсутствие физико-механических и физико-химических процессов взаимодействия флюидов и образцов;

б) термического моделирования и анализа метасоматических и метаморфических систем.

В результате обработки значений проницаемости, полученных с использованием двух подходов, было установлено, что проницаемость континентальной земной коры уменьшается с глубиной [4]:

а) по степенному закону (в отсутствие физико-механических и физико-химических процессов взаимодействия),

$$\lg(k) = a + b \cdot h^c, 1, \quad (6)$$

где  $k$  – проницаемость;  $a = -12,56$ ;  $b = -3,225$ ;  $h$  – глубина, км;  $c = -0,2230$ ;

б) в соответствии с уравнением (термическое моделирование и анализ метасоматических и метаморфических систем),

$$\lg(k_{MI}) = -3,21 \lg(h) - 14. \quad (7)$$

Для перехода от значений проницаемости к значениям модуля Юнга воспользуемся соотношением, связывающим между собой модуль Юнга ( $E$ ), поверхностную энергию ( $T_s$ ) и проницаемость (4)

Из соотношения (4) в результате элементарных преобразований получаем

$$E = 8,1 \cdot T_s (1/k)^{1/2}. \quad (8)$$

При подстановке значений проницаемости, полученных с использованием соотношений (6) и (7), в соотношение (8) получим соответственно значение модуля Юнга для пород континентальной земной коры в отсутст-

вие физико-механических и физико-химических процессов (E) и для пород земной коры при метасоматических и метаморфических процессах ( $E_{MI}$ ).

Известно, что активный флюидный режим характерен для глубинных сдвиговых зон, так же, как и высокая интенсивность метасоматоза. «.. Интенсивный флюидный режим выявляется для сдвиговых зон разного ранга – как для верхнекоровых, так и для сквозкоровых. В последних, по изотопным данным, фиксируется воздействие глубинных (а не только приповерхностных) флюидов» [22]. Из приведенной цитаты следует, что наличие водных флюидов возможно во всем интервале глубин земной коры континентального типа. Это и может быть причиной снижения прочностных характеристик и модуля Юнга горных пород. Для оценки этих изменений рассчитаем изменение по глубине отношение величин E и  $E_{MI}$  - относительное изменение модуля Юнга под действием водных флюидов.

Полученные авторами оценки модуля Юнга, соотношения (6), (7) и (8) используем для оценки  $k$  и  $k_{MI}$ , а также  $E/E_{MI}$ . После достаточно простых преобразований получим

$$\frac{E}{E_{MI}} = 0,19 \cdot 10^{C-D}, \quad (9)$$

где  $C = 1,6125 \cdot h^{0,2230}$ , а  $D = 1,6 \cdot \lg(h)$ ,  $h$  - глубина, км

Результаты расчета  $E/E_{MI}$  для земной коры представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Изменение  $E/E_{MI}$  в земной коре

h - глубина, км	1	5	10	15	20	25	30	35	40
$E/E_{MI}$	7,78	2,95	2,36	2,25	2,20	2,23	2,28	2,35	2,43

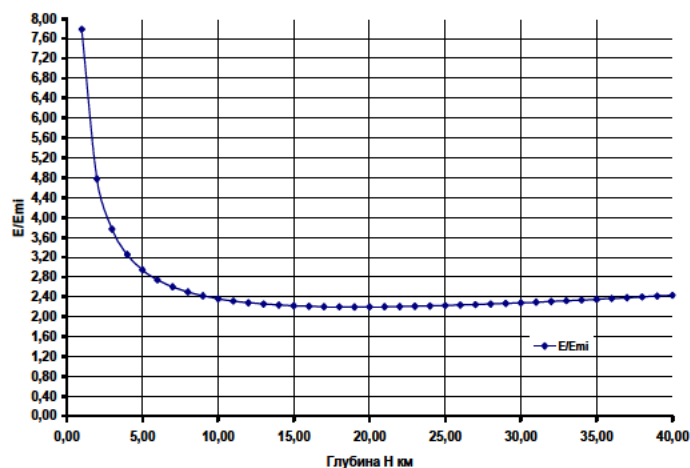


Рис.1. Изменение  $E/E_{MI}$  в земной коре

Анализ результатов расчета  $E/E_{mi}$ , представленных в табл. 2 и на графике (рис. 1), позволяет выделить верхнюю часть земной коры до глубины 10 км как область максимальных изменений (уменьшения) модуля Юнга при наличии метасоматических и метаморфических систем, присутствие, или отсутствие которых может приводить к изменению значений модуля Юнга в несколько раз, что, несомненно, не может не привести и к уменьшению прочностных свойств горных пород. Следует обратить внимание и на глубину 20 км, до достижения которой происходит уменьшение значений  $E/E_{mi}$  (до 2,20), а затем, с увеличением глубины, начинается медленный рост значений  $E/E_{mi}$ . Отметим, что именно на верхнюю часть земной коры (до 20 км) приходится и большинство гипоцентров коровых землетрясений [23].

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- значения модуля Юнга частей земной коры, задействованных в метасоматических и метаморфических процессах, уменьшаются в несколько раз (от 2,4 до 7,8) по сравнению с незадействованными частями земной коры;

- наибольшее уменьшение модуля Юнга при наличии метасоматических и метаморфических систем происходит в верхней части земной коры.

### Список литературы

1. Кольская сверхглубокая. Исследования глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины /Под ред. Е.А. Козловского. М.:Недра. 1984. 490 с.
2. Галдин Н.Е. Глубинное строение, вещественный состав и физические свойства толщ древнейшей земной коры по геолого-геофизическим исследованиям сверхглубоких скважин: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. Тверь, 1993.
3. Семашко С.В. Акустические и геотермические исследования зон повышенной проницаемости архейского комплекса в разрезе Кольской сверхглубокой скважины: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. Тверь, 1994.
4. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Флюидная проницаемость пород земной коры. М.: Научный мир, 2002. 216 с.
5. Huenges Enst, Profiles of permeability and formation – pressure down to 7,2 km// КТВ REPORT 93-2. Hannover, 1993. P. 279 – 285.
6. Любимова Е.А., Милановский С.Ю., Смирнова Е.В. Новые результаты изучения теплового потока на Балтийском щите// История развития теплового поля в зонах различного режима стран Восточной Европы. М., 1985. С. 93-110.

7. Березин В.В., Попов Ю.А. Геотермический разрез Печенгской структуры// Изв. АН СССР. Физика Земли, №7. 1988. С.80-88.
8. Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: ВНИИ-геосистем, 2003. 219 с.
9. Соболев Г.А., Понаморов А.И. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
10. Мухамедиев Ш.А., Галыбин А.Н. Где и как зародились разрывы землетрясений 26.12.04 и 28.03.05 у острова Суматра// Доклады Академии Наук. 2006. Т. 406. №1. С. 95-98.
11. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Адаманским землетрясением 26.12.04// Доклады Академии наук. 2006. Т. 407. №1. С.106-110.
12. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристика сейсмичности и поля поглощения S-волн в районе очага Суматринского землетрясения 26 декабря 2004// Доклады Академии наук. 2008. Т. 422. №5. С.672-676.
13. Семашко С.В. Динамические процессы и пористость в литосфере// Изв. ТулГУ. Геоинформационные технологии в решении региональных проблем. 2005. Вып. 2. С.122-127.
14. Семашко С.В. Оценка изменений напряженного состояния глубинных зон земной коры при современных геодинамических процессах// Изв. ТулГУ. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2006. Вып. 8. С.87-91.
15. Зверев В.П. Новые данные о массе имассопотоках вподземных вод в земной коре// Доклады Академии наук. 2004. Т. 397. №5. С.660-663.
16. Родкин М.В. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М., 1993. 194 с.
17. Каспарьян Э.В. Устойчивость горных выработок в скальных породах. Л.: Недра, 1985. 184 с.
18. Родкин М.В., Никитин А.Н., Васин Р.Н. Сейсмотектонические эффекты твердотельных превращений в геоматериалах. М.: ГЕОС, 2009. 198 с.
23. Щукин Ю.К., Юдахин Ф.Н. Геодинамическая модель и сейсмичность. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 353 с.

*S.V. Semashko*

*MODERN FLUIDS MOTION IN EARTH'S CRUST*

*It was disclosed that Yung modulus decreases at 2.8. -7.8 times if continental parts of Earth's crust taking into account at the metasomatic and metamorphic processes.*



*Key words: fluids, porosity, permeability, vertical component of filtration velocity, heightened permeability zone, seismic research, Q-factor, Yung modulus, earthquake focal zone, rocks, metasomatic and metamorphic processes, changing Yung modulus.*

Получено 24.11.11