

ФЛЮИДЫ В КЛАССИФИКАЦИИ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ. ОТОБРАЖЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ФЛЮИДА В ЗОНАХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ В ПАРАМЕТРАХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Часть 1

А.М. Кузин

ИПНГ РАН, e-mail: amkouzin@yandex.ru

Флюид и разрывные нарушения. Влияние флюида на разрушение горных пород

Разрывные нарушения – одна из распространенных форм существования геологической среды. Важнейшей функцией разрывного нарушения (РН) является транспортировка флюидов. Флюиды ответственны за большую часть явлений и процессов и их интенсивность, включая в ряде случаев образование самих разрывных нарушений. РН и флюид совместно участвуют во многих главнейших геологических процессах и явлениях, землетрясениях, магматизме (вулканизме), в образовании месторождений полезных ископаемых, поддержании или разрушении экосистем. С позиции проницаемости геосреды флюидом зоны трещиноватости и РН могут быть объединены общим термином РН. Многие вопросы внутреннего строения РН, а также онтология изучения РН освещались во многих работах автора, наиболее полных из них [Кузин, 1999; 2004; 2014–2015].

В геологии нефти и газа изучение экранирующих и дренирующих свойств зон РН остается приоритетной задачей прикладных исследований. Об этом свидетельствует регулярная постановка такой тематики на различных семинарах и конференциях, в частности тематика четвертой конференции Европейской ассоциации геоученых и инженеров («Покрышки и экранирующие разломы: наука или искусство?», состоявшаяся в сентябре 2015 года в Испании [Риле, 2015]. В частности, там обсуждались такие вопросы как: 1. Реактивация и экранирующие свойства разломов; 2. Детали строения зон разломов; 3. Просачивание флюидов сквозь зоны разломов; 4. Важность исследования экранирующих свойств разломов и покрышек. В качестве одной из «инновационных» идей (J.S. Davis, F.V. Corona) был предложен способ прогноза фазового состояния флюидов по свойствам покрышек, «основанный на предположении, что в областях развития залежей, содержащих и нефть и газ, газ будет просачиваться через покрышки худшего качества и удерживаться высококачественными покрышками» [Риле, 2015]. Необходимо отметить, что этот «способ» 40 лет назад был теоретически и

экспериментально описан и обоснован для месторождений углеводородов в монографии [Савченко, 1977].

О масштабах флюидного воздействия свидетельствуют объемы пород, прошедшие зеленокаменную стадию метаморфизма, фильтрация флюида в них проходила без существенных деформаций (например, формирование порфиробластов биотита в самых разнообразных породах, не содержащих необходимых компонентов для образования этого минерала, в том числе и карбонатных). Суммарный объем порфиробластов иногда достигает почти половины объема породы, это значит, что привнос и вынос вещества достигали значительной величины. При этом отсутствуют заметные следы деформации во время образования порфиробластов: зерна биотита не деформированы, ориентировка их разнообразна, а, главное, внутри зерен нередко сохраняются цепочки включений, не искажающие текстуру основной массы, которая бывает часто смята в микроскладки, то есть, деформация закончилась до образования порфиробластов [Эз, 2009].

В региональных структурах РН, дренирующих различные глубинные уровни, выделяют следующие [Русинов, 2006]: 1 – сквозные каналы (кольцевые щелочно-ультраосновные – карбонатитовые комплексы, трубки взрыва); 2 – ступенчатые открытые трещины с промежуточными камерами флюидно-магматической дифференциации (трапповые формации); 3 – региональные зоны сдвиговых деформаций с пространственной сепарацией флюидопотока; 4 – открытые прерывистые каналы областей орогенеза (гранодиорит-андезитовые вулcano-плутонические формации). Региональные зоны сдвига служат основными миграционными системами флюидных потоков. По характеру флюидных потоков различаются [Pili et al., 1997]: 1 – зоны сдвига длиной от нескольких сотен метров до десятков километров, при ширине десятки метров, ограниченные по глубине верхней корой (они аккумулируют, существенно водные растворы); 2 – зоны длиной сотни километров, при ширине сотни метров, которые проникают в нижнюю кору и мантию. По ним происходит восходящая миграция мантийных флюидов, богатых CO_2 .

Обычно подразумевается, что присутствие РН почти всегда обеспечивает канал миграции флюида. Однако это далеко от реальности. РН, как и другие геологические тела, обладают разнообразными свойствами и, прежде всего, различной проницаемостью. Как показывают последние исследования, проницаемость горных пород является существенно более сложным процессом, чем представлялось ранее. В результате длительных

(несколько месяцев) экспериментов с керном различных осадочных пород, различающихся по проницаемости приблизительно на два порядка, было обнаружено, что после стадии резкого снижения скорости пропитки (и кажущегося выхода кривой насыщенности на асимптоту) наступает стадия резкого возрастания скорости пропитки до достижения нового максимума [Барабанов, 2014]. Причина такого эффекта пока не совсем понятна, возможно, определенную роль здесь играют совместные воздействия высокой диэлектрической проницаемости воды и раскрытия швов от ранее существовавших каналов отжатия воды при литификации осадков. Поэтому РН можно рассматривать как разновидность в миграции флюида в геологической среде при наименьшей затрате времени.

Наличие флюида определяет потенциальную активность РН и позволяет оценить ее на качественном уровне. Между РН и флюидом происходит взаимодействие, при этом меняются флюид и физико-химические, упруго-деформационные и фильтрационные свойства самого РН. Тем не менее, как отдельное направление – исследование взаимосвязей РН и флюидов в геологии и геофизике – не сложилось и носит несистемный характер. Превалирующим направлением в теоретических и экспериментальных исследованиях обычно является изучение особенностей механизмов вертикальной фильтрации и инфильтрации флюида в земной коре и мантии. В работах [Летников и др., 1986; Летников, 2000; Родкин, 1993] обосновывается ведущая роль зон милонитизации как транспортной сети для флюидных потоков из верхней мантии и нижней части земной коры. В зонах бластомилонитов вдоль плоскостей расщепления обеспечивается универсальный и интенсивный массоперенос флюидных, петрогенных, рудных компонентов и углеводородов [Летников и др., 1986; Летников, 2006]. Милониты в зонах РН обычно представлены прослоями ультрамелкозернистых пород с проявлениями рекристаллизации и флюидизации. Чем больше диспергация среды, тем выше ее смачиваемость. К тому же присутствие флюида при рекристаллизации пород увеличивает их прочность в отдельных зонах РН. В результате формируется упруго-деформационная зональность, процесс разрушения мигрирует на границы РН, возникают новые проницаемые для флюида зоны [Ребецкий, 2009].

Интенсивность тектонических подвижек по разлому способствует флюидизации последнего. В процессе трансляции трещин флюид выдавливается из закрывающихся трещин во вновь открывающиеся. Такой механизм перетекания флюида позволяет

рассматривать трещиноватость в зоне сдвига как систему сообщающихся трещин, флюидное давление при этом может быть меньше литостатического [Русинов, 2006].

Под влиянием влаги могут реализоваться два типа механизма понижения прочности пород [Траскин, Скворцова, 2006]. Первый связан с трещинно-пористым пространством, в котором внедрение жидкости создает концентраторы напряжений. Второй – является универсальным, всегда присутствующим в горных породах, это – межзеренные границы. Растворение и перенос вещества по межзеренным прослойкам в поле приложенных напряжений может на несколько порядков превышать скорость перемещения атомов в твердой фазе и, соответственно, служить ведущим механизмом миграции флюидных потоков в нижней коре и мантии.

В трещиноватой, водонасыщенной среде только часть нормальной нагрузки приходится на скелет породы, другая – воспринимается жидкостью, при этом касательные напряжения воспринимаются полностью скелетом породы [Николаевский, 1984]. Присутствие влаги в трещинах также существенно снижает величину поверхностной энергии, это способствует росту трещин при относительно низких касательных напряжениях. Например, прочность на сжатие у песчаников с пористостью около 10% снижается на 70%, у известняков с пористостью 15% – на 50%, у габбро-долеритов и базальтов с пористостью 3–5% – на 20% [Теоретические основы..., 1986].

В экспериментах по деформированию модели (состоящей из кварцевого песка, гранитной крошки и цемента) в условиях двухосного сжатия и продолжительностью в несколько месяцев (при квазистатическом уровне приложенных напряжений) модель периодически подвергалась инъекции воды [Соболев и др., 2006]. Было установлено, что инъекция малого количества воды в область активных трещин приводит к резкой активизации акустической эмиссии. Форма сейсмограмм и графики повторяемости акустических сигналов, зарегистрированных до и после инъекции воды, мало различаются, что говорит о триггерной природе эффекта. Таким образом, вода служит катализатором и источником развития процесса неупругой деформации в зонах РН.

Конвекция в настоящее время является одним из важнейших механизмов преобразования литосферы. Химические элементы и соединения в разных формах участвуют в круговороте между различными глубинными уровнями (от осадочного чехла до мантии, включительно). Мощность мантии приблизительно 2900 км, наибольшая мощность земной коры – около 80 км, в среднем, 30–40 км. Мощность коры составляет

меньше 1,5% от мощности мантии, поэтому все геологические процессы и явления в земной коре прямо или косвенно связаны с мантийными процессами. Конвекция установлена в различных масштабах и на разных глубинных уровнях геологической среды (от мантии и до самых верхов разреза). Ее максимальная интенсивность наблюдается в верхней части земной коры, за счет воды и ее растворов. Существование мантийной конвекции приводит к необходимости совместного рассмотрения эндогенной и экзогенной составляющих процессов образования и накопления углеводородов и рудной минерализации. В качестве наиболее яркого примера глубинной конвекции можно привести изотопный состав алмаза. У большинства алмазов изотопный состав углерода совпадает с изотопным составом углерода земной коры [Галимов, 1988].

По современным оценкам, проникновение свободной воды в земную кору ограничено глубиной, порядка 10–15 км. Следовательно, в пределах этих глубин можно ожидать, что наиболее сильные отражающие границы РН содержат жидкую фазу флюида. Ранее о возможной взаимосвязи «множественных субгоризонтальных отражающих площадок» (зона рефлексивити) с «мелкими» флюидными скоплениями была высказывалось в работе [Киссин, 2006]. Несопоставимо большее внедрение воды в земную кору может происходить по горизонтальным РН. Например, по данным [Виноградов, 2002], интервал горизонтального проникновения морской воды в пределах островов может достигать 150 км.

О физико-химических свойствах воды и формах ее нахождения в геологической среде

Воздействие воды на геологическую среду определяется ее уникальными свойствами. В отличие от большинства соединений, плавление воды сопровождается ее сжатием. Наименьшим удельным объемом вода обладает при температуре, равной 4 °С, а не при 0 °С. От 0 до 4 °С плотность воды возрастает и начинает уменьшаться при больших температурах. Из всех жидкостей вода – самый сильный растворитель. Это обусловлено ее исключительной диэлектрической проницаемостью, равной 80,1 при 20 °С. Физически это означает, что два противоположных по знаку заряда (иона) в воде взаимно притягиваются с силой, в 80 раз меньшей, чем в воздухе. Диэлектрическая проницаемость, необычная зависимость вязкости воды от давления, большие теплоемкость воды и ее поверхностное натяжение, а также другие свойства определяют уникальность воды.

Необычность свойств воды обусловлена наличием водородного типа связи. Суть водородной связи состоит в том, что ион водорода, связанный с каким-то ионом другого

элемента, способен электростатически притягивать к себе еще один ион того же элемента. Состав молекулы воды из двух атомов водорода и одного атома кислорода обеспечивает наличие в ней трех электрических центров: двух положительных и одного – отрицательного. Благодаря такому строению, каждая молекула воды в состоянии образовать четыре водородные связи. В настоящее время установлены следующие расстояния между отдельными атомами в молекулах воды, соединенных водородной связью: $O-H = 0,0976$ нм и $H...O = 0,176$ нм, то есть, водородная связь, оказывается длиннее химической на 70%. Угол связи, образованный двумя атомами водорода $H-O-H$, равный $107,2^\circ$, близок к углу тетраэдра. Поэтому молекулу воды уподобляют тетраэдру, два угла которого заряжены положительно, а два – отрицательно. Вследствие этого молекула воды является электрическим диполем и диэлектрической постоянной, равной 87,74 при $0^\circ C$. Таким образом, аномально высокая диэлектрическая проницаемость воды определяются наличием в воде водородных связей. Благодаря водородным связям в расположении молекул воды образуется упорядоченная структура, что сближает ее с твердым телом [Шварцев, 1996].

Однако вследствие таких связей в структуре воды появляются пустоты, определяющие большую рыхлость в ее строении. Для разрыва водородных связей необходима значительно большая энергия, чем для одних ван-дер-ваальсовых сил, которые связывают молекулы в газах. Этим и объясняется несоразмерно высокая температура плавления воды. Именно водородными связями предопределяется наличие аномалий в физических свойствах воды.

В основе выделения различных типов воды в горных породах лежит уточненная классификация А.Ф. Лебедева (1936 г.), которая в современном виде выглядит следующим образом [Шварцев, 1996]:

I. Вода, входящая в состав кристаллической решетки минералов или химически связанная вода: 1) конституционная; 2) кристаллизационная; 3) цеолитная.

II. Вода, физически связанная с горными породами: 1) прочносвязанная или адсорбированная; 2) рыхло- или слабосвязанная.

III. Свободная вода: 1) капиллярная; 2) гравитационная.

IV. Вода в твердом состоянии – лед.

V. Вода в состоянии пара.

В области надкритических температур и давлений, при $T > 374\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P > 21,8\text{ МПа}$ вода находится не только в состоянии пара, но образуется и жидкая фаза. Образование жидкой фазы объясняется высоким давлением, ведущим к увеличению плотности газовой фазы. При сжатии средняя длина свободного пробега молекулы воды уменьшается настолько, что каждая частица оказывается в поле действия притяжения соседних молекул. Так могут возникнуть ассоциации молекул воды, соединенных водородными связями, т.е. вода физически будет соответствовать жидкой [Шварцев, 1996].

Нижняя граница жидкой воды может достигать глубины в 70 км. Считается, что граница земной коры (граница Мохоровичича) и есть не что иное, как граница фазовых переходов воды [Григорьев, 1971]. В магме вода находится в растворенном и диссоциированном состоянии.

По современным воззрениям, магма содержит 5–7% воды, из которых большая часть диссоциирована не только на ионы H^+ и OH^- , но также образует O_2^- , являющийся индикатором щелочности расплава. При остывании магмы большая часть воды выделяется в виде пара. В гранитном слое, где T и P равны, соответственно, 200–500 $^{\circ}\text{C}$ и 1000–3500 МПа, вода находится преимущественно в молекулярном состоянии [Кононов, Ильин, 1971]. Это – зона жидких структурированных вод. Ее глубина на древних платформах может достигать 80 км, что на 10 км глубже, нежели по оценкам [Григорьев, 1971], но в обоих случаях, это – глубины, ниже поверхности Мохоровичича.

В нижней части консолидированной коры, где T возрастает до 600 $^{\circ}\text{C}$, а давление – до 7500 МПа, вода диссоциирует на H^+ и OH^- , которые входят в решетку минералов. Это зона уплотненного флюида, где водородные связи в основном разорваны, но образуются, вероятно, нестойкие димерные ассоциаты воды. Подошва этой зоны располагается на глубинах около 160 км. В эклогитовом слое T увеличивается до 800–1000 $^{\circ}\text{C}$, а P – до 7500–11000 МПа. В этих условиях возможно существование только мономерной воды, которая в той или иной мере диссоциирует на H^+ и OH^- . Для давлений порядка 22 кбар, энергетически выгодным становится вхождение воды в кристаллическую решетку минералов [Адушкин, Родионов, 2005]. Вхождение воды в дефектную структуру главных минералов верхней мантии (оливина, пироксена) существенно влияет на скорости сейсмических волн, электропроводность, вязкость. Возможно, это вносит значительный вклад в возникновение зон пониженных сейсмических скоростей, повышенной

электропроводности и вязкости [Karato, 1990; Karato, Jung, 1998; Freund, 2003]. Такая вода может существовать на глубине порядка 270 км.

С переходом водного флюида в кристаллическую решетку минералов связывается повышенный уровень сейсмичности на глубине около 70 км [Левин и др., 2009]. Это еще одно из объяснений повышенных значений V_p/V_s (отношения скорости продольной V_p волны к скорости поперечной V_s) в верхней мантии, связанное с водой (помимо повышенного содержания Fe в мантийных породах).

Отсюда можно заключить, что резкой границы перехода от молекулярной к мономерной воде не существует.

Высокая растворяющая способность воды наблюдается не только при сверхкритических условиях. В тонких капиллярах, в условиях, когда воздействие поверхностных сил распространяется по всему сечению, относительно свободные молекулы воды из-за разнонаправленного притяжения не могут ассоциироваться водородными связями в тетраэдрические координации свободной воды. По аналогии с высокотемпературной водой образуются легкоподвижные димерные ассоциаты, и трансляционное движение молекул увеличивается. На основе экспериментальных исследований был сделан вывод об аномальной растворяющей способности высокодисперсных систем при давлении более 20 Мпа, в частности, содержание кремнезема в них на порядок превышает предельные значения для истинных растворов в обычной воде [Симоненко, 1988].

Физически связанная вода резко отличается по свойствами от свободной воды. Средняя плотность связанной воды глин превышает плотность свободной воды и колеблется в пределах 1,2–1,4 г/см³. Снижение полярности молекул воды обычно ведет к увеличению ее растворяющей способности. Диэлектрическая постоянная связанной воды значительно меньше, чем свободной, и зависит от влажности горной породы.

Связанная вода (прочносвязанная и слабосвязанная) содержится в горных породах в виде гидратных оболочек, облекающих мельчайшие минеральные частицы породы. Прочносвязанная вода превращается в обычную воду при температуре 200–300 °С. При геостатическом давлении около 15–20 МПа температурный порог может снизиться до 30–50 °С. Такая отжатая из тонких пор вода получила название горного или порового раствора. В естественных условиях поровые растворы отжимаются при уплотнении осадков под действием собственного веса. Энергия физической адсорбции измеряется

несколькими килокалориями на моль и не превышает 22 ккал/моль. Полиструктурность воды может рассматриваться как существенный фактор флуктуации параметров и характеристик сейсмического поля.

Изменение структуры воды ведет к изменениям ее физико-химических свойств и, соответственно, ее способности растворять и транспортировать химические элементы и их соединения. Эти свойства связанной воды весьма существенно различаются в статическом ее состоянии и в динамическом (при ее перемещении). Толщина слоя граничной фазы вблизи адсорбирующей поверхности составляет 10–1000 Å. При перемещении поверхностей, покрытых связанной водой, навстречу друг другу возникает эффект расклинивающего давления (открыт Б.В. Дерягиным в 1937 г.), который объясняется сопротивлением граничных фаз связанной воды, аналогично сопротивлению одноименных полюсов магнита. Это ведет к вытеснению флюида между слоями связанной воды. В дальнейшем при уменьшении расстояния между сближающимися поверхностями (до толщины пленки 1–10 Å) расклинивающее давление падает и становится отрицательным, поверхности начинают притягиваться [Симоненко, 1988].

В случае, когда в зоне дробления имеется прослой глины трения, этот эффект может оказывать существенное влияние не только на отжатие воды из глинистой толщи пород (диаметр поровых каналов меньше 0,5 мкм) и образование пластов разной плотности [Симоненко, 1988], но также и на поддержание активности РН. Вариации поля тектонических напряжений обуславливают колебания флюидного порового давления и, соответственно, приводят в действие механизм фильтрации флюидных растворов.

Следовательно, каждый реологический уровень тектоносферы содержит флюид, в котором в том или ином виде присутствует вода. Разнообразие физического состояния воды, формы ее нахождения в геологической среде оказывают существенное влияние на упругие свойства пород осадочного чехла и консолидированной коры. Обладающие сами по себе низкой упругой контрастностью, магматические и метаморфические породы, залегающие на различной глубине, за счет флюида будут создавать неоднозначность при прогнозировании вещественного состава породных комплексов.

Таким образом, разрывные нарушения аккумулируют флюиды и служат основными магистралями переноса вещества и энергии, поэтому упругие свойства РН должны зависеть от флюида, его фазового состава, свойств наполнителя трещинно-порового пространства.

Классификация разрывных нарушений с учетом воздействия флюидного фактора

Существует достаточно много различных классификаций РН – от наиболее общих, тектонических [Белоусов, 1954; Гзовский, 1975], включая структуры центрального типа [Соловьев, 1978], до РН в нефтегазоносных бассейнах [Дорофеева, 1986], в рудных провинциях [Рос. металлоген. словарь, 2003]. Однако классификации РН с учетом роли и значения флюида в образовании и формировании РН, когда активность и пассивность РН рассматриваются в зависимости от содержания флюида, его фазового состава и миграции, не существует.

По генезису образования РН можно разделить на три типа:

- 1 – образовавшиеся непосредственно под воздействием флюида (флюид как источник и движущая сила процесса разрушения);
- 2 – образовавшиеся при участии флюида (флюид создает условия для формирования определенного типа РН, например, надвигов);
- 3 – интенсивность развития РН зависит от присутствия флюида (флюид препятствует закрытию РН, способствует развитию процесса выщелачивания пород в зонах РН).

В *первом типе* по механизму образования можно выделить РН, образовавшиеся за счет разрыва упругих связей в породе, например, трубки взрыва, питающие магматические каналы (из-за внедрения магмы). Сюда же могут быть отнесены кольцевые и вихревые разрывные структуры, сформировавшиеся при вторжении флюидов. При этом геометрическое строение этих структур не зависит от механических свойств пород, слагающих разрез [Муравьев, Новиков, 1986].

Флюиду принадлежит ведущая роль в дилатансионно-диффузионной модели очага землетрясения [Scholz, 1973] и метаморфогенной модели сейсмоактивного слоя континентальной коры [Киссин, 1996]. Согласно последней модели, очаги землетрясений образуются на контакте блоков земной коры с различными условиями дегидратации пород. В последнее десятилетие установлен вихревой характер миграции очагов землетрясений [Шевченко и др., 2011; Кутинов, Беленович, 2007] и вулканов [Масуренков и др., 2010]. Энергетически образование листрических или наклонных разрывных нарушений в кольцевых или вихревых структурах за счет флюидной проработки коры должно быть более предпочтительным, чем только за счет смещения тектонических блоков. Возможно, что при сквозной коровой миграции флюида заложение вихревых и

кольцевых структур не обходится без начальной проработки пород легкими газами (водород, гелий). Лепестковая структура (овоид), образованная разрывными нарушениями, по-видимому, может служить их отличием от листрических разломов тектонической природы [Кузин, 2014]. Как правило, месторождения флюидного генезиса находятся в обрамлении лепестковых структур [Кузин, 1994; 2004; 2008], что может рассматриваться косвенным признаком флюидного воздействия на среду в форме вертикального мантийного или нижнекорового вторжения флюидов («труба дегазации», по П.В. Кропоткину).

К этой же группе относятся РН, образовавшиеся согласно механизму гидрогенно-химического разуплотнения [Боревский, Кременецкий, 1985]. Суть его заключается в том, что при метаморфизме водосодержащих пород в случае их экранирования вышележащей толщей, повышение температуры приводит к увеличению флюидного давления по принципу автоклавного эффекта и обуславливает реакцию дегидратации. Если давление флюида больше прочности пород, происходит их разрушение и удаление части флюида. Для глубин в несколько километров в тектонически активных районах горизонтальные напряжения преобладают над вертикальными, поэтому возникающие трещины отрыва будут ориентированы в направлении максимальных напряжений, т.е. горизонтально. Низкая сжимаемость воды обеспечивает ее исключительное значение в образовании гидроразрыва. Явление гидроразрыва зафиксировано в глубоких скважинах (например, Аралсорской в Прикаспийской впадине). В зонах гидрогенно-разуплотненных глинистых пород скорость продольной волны понижается на 0,5–1,0 км/сек [Боревский, Кременецкий, 1985]. Явление гидроразрыва пластов широко используется в практике промысловых работ, в пластах искусственно создаются многие десятки тысяч искусственных гидроразрывов за счет только 0,5–0,75 величины горного давления [Еременко, Чилингар, 1996].

К *второму типу* относятся РН, в которых флюид оказывает влияние на направление развития деформации. На рис. 1 представлен характерный для Техаса геологический разрез, наблюдаемый при пересечении сбросами дегидратированного пласта смектита [Clemont, 1984]. Дегидратация монтмориллонита связана с переходом смектита в иллит, при данном переходе выделяется вода и идет процесс разуплотнения породы. Углы наклона поверхности сместителей сброса до глубины 3000 м составляют 60°, а в зоне дегидратации они уменьшаются до 15°. Здесь флюид меняет направление

развития сместителя РН. Внешний вид РН очень напоминает схему лучей сейсмической волны, распространяющейся в слоистой среде при переходе из низкоскоростного слоя – в высокоскоростной.

К этому же типу относится образование унаследованного простирания трещиноватости из докембрийского фундамента в осадочный чехол платформ вследствие ориентированного движения порового флюида и гидроразрыва [Грачев, 2007]. Здесь преимущественно вертикальное движение порового флюида (воды) приводит к образованию вертикальных трещин и РН в осадочном комплексе платформ.

Еще одним наиболее известным проявлением флюидного воздействия на РН является образование надвигов [Hubbert, Rubey, 1959]. Вода нейтрализует геостатическую нагрузку, уменьшает трение при горизонтальном перемещении значительных масс горных пород. В эту же группу следует еще включить не менее распространенный тип – зоны субдукции, обеспечивающие поступление огромного количества воды в земную кору и верхнюю мантию.

Условно к тому же второму типу можно отнести РН, в которых флюидодинамическая активность обусловлена фильтрацией воды через шовную зону, имеющую прослой в виде «глинки трения». При флуктуации поля тектонических напряжений по глинке трения между поверхностями, покрытыми связанной водой, возникает эффект расклинивания и притяжения. Он обуславливает колебания флюидного порового давления и, соответственно, приводит в действие механизм поровой фильтрации флюидных растворов.

К *третьему типу* относятся РН, в которых флюидный фактор оказывает влияние только на интенсивность процесса деформации. К этому типу принадлежат фактически все РН, содержащие воду. Например, увеличение концентрации флюида в зоне сдвига ведет к ускорению его развития [Русинов, 2006].

Таким образом, роль флюида в образовании и развитии разрывных нарушений может быть весьма разнообразна.

Выводы

Флюид существенно влияет на упругие свойства горных пород, и это влияние наиболее критично в зонах разрывных нарушений.

В геологической среде флюид – это неотъемлемая составная часть процесса образования и развития разрывных нарушений. Предложена классификация разрывных нарушений в зависимости от роли флюида в процессе их образования и развития.

ЛИТЕРАТУРА

Адушкин В.В., Родионов В.Н. О природе механического движения в недрах Земли // Физика Земли. 2005. № 2. С. 88–91.

Барабанов В.Л. Параметры модели противоточной капиллярной пропитки горных пород // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 1. С. 27–52.

Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1954. 606 с.

Боревский Л.В., Кременецкий А.А. Рудообразующая роль морфогенных гидротерм // Подземные воды и эволюция литосферы: Материалы Всесоюз. конф. М.: Наука, 1985. Т. 2. С. 179–182.

Виноградов В.И. Вертикальная аккреция в свете данных изотопной геохимии // Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы: Труды ГИН РАН. М.: Наука, 2002. Вып 542. С. 356–387.

Галимов Э.М. Проблемы геохимии углерода // Геохимия. 1988. № 2. С. 258–279.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

Грачев А.Ф. О природе закономерной ориентировки трещин в горизонтально залегающих осадочных породах Восточно-Европейской платформы // Физика Земли. 2007. № 5. С. 24–42.

Григорьев С.М. Роль воды в образовании земной коры. Дренажная оболочка земной коры. М.: Недра, 1971. 213 с.

Дорофеева Т.В. Тектоническая трещиноватость горных пород и условия формирования трещинных коллекторов нефти и газа. Л.: Недра, 1986. 224 с.

Еременко Н.А., Чилингар Г.В. Геология нефти и газа на рубеже веков. М.: Наука, 1996. 176 с.

Киссин И.Г. Метаморфогенная дегидратация пород земной коры как фактор сейсмической активности // Доклады РАН. 1996. Т. 351, № 5. С. 679–682.

Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры и геодинамические процессы // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 85–104.

Кононов В.И., Ильин В.А. О состоянии и поведении воды в земных недрах в связи с процессами метаморфизма // Значение структурных особенностей воды и водных растворов для геологической интерпретации. М., 1971. Вып. 2. С. 35–65.

Кузин А.М. Разработка методики прогноза залежей флюидального генезиса по данным сейсмических методов // Прикладная геофизика (50 лет ВНИИГеофизике). М.: Недра, 1994. Вып. 131. С. 396–406.

Кузин А.М. Некоторые особенности интерпретации волновых полей в зонах разрывных нарушений // Геофизика. 1999. № 5. С. 3–15.

Кузин А.М. Условия сохранения как поисковый критерий для крупных месторождений флюидального генезиса // Приоритетные направления поисков крупных и уникальных месторождений нефти и газа. М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. С. 192–211.

Кузин А.М. Диалектика в интерпретации сейсмических данных // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы: Материалы Всерос. конф. М.: ГЕОС, 2008. С. 242–246.

Кузин А.М. О флюидной составляющей процесса образования зон трещиноватости и разрывных нарушений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014. № 5. С. 43–50.

Кузин А.М. О некоторых закономерностях и особенностях распределения скорости продольных волн в зонах разрывных нарушений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2015. № 7. С. 38–46.

Кутинов Ю.Г., Беленович Т.Я. Современная геодинамическая модель Севера Евразии // Геофизика XXI столетия: 2006 год: Сб. тр. геофиз. чтений им. В.В. Федынского. М.: Изд-во ГЕРС, 2007. С. 119–124.

Левин Б.В., Родкин М.В., Сасорова Е.В. Особенности сейсмического режима литосферы – проявления воздействия глубинного водного флюида // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Материалы докл. Всерос. конф. М.: ИФЗ РАН, 2009. Т. 2. С. 345–353 с.

Летников Ф.А., Савельева В.Б., Балышев С.О. Петрология, геохимия и флюидный режим тектонитов. Новосибирск.: Наука, 1986. 223 с.

Летников Ф.А. Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении // Проблемы глобальной геодинамики: Материалы теорет. семинара ОГГГТН РАН, 1998–1999 гг. М.: ГЕОС, 2000. С. 204–224.

Летников Ф.А. Флюидный механизм деструкции континентальной земной коры и формирование осадочных нефтеносных бассейнов // Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезисы в системе горючих ископаемых: Тез. докл. Междунар. конф. М.: ГЕОС, 2006. С. 6–9.

Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Комкова Л.А., Лаверова Н.И. Флюидно-магматические системы Северного Кавказа. // Экстремальные природные явления и катастрофы: в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. Т. 1. С. 163–196.

Муравьев В.В., Новиков В.Л. Механизм формирования и закономерности строения концентрических структур в платформенных областях // Математические экспериментальные методы в дизъюнктивной тектонике. М.: Наука, 1986. С. 29–38.

Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.

Ребецкий Ю.Л. Разлом – особое геологическое тело в земной коре // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докл. Всерос. конф. М.: ИФЗ РАН, 2009. Т. 2. С. 123–131.

Риле Е.Б. Экранирование залежей углеводородов разрывными нарушениями – четвертая конференция EAGE в Испании [Электронный ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: Электрон. науч. журн. 2015. Вып. 2(12). – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 21.12.2016).

Родкин М.В. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М.: Национальный геофизический центр РАН. 1993. 194 с.

Российский металлогенический словарь / Под ред. А.И. Кривцова. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 2003. 320 с.

Русинов В.Л. Взаимодействие флюидных потоков и сдвиговых деформаций в литосфере: механизмы и геологические следствия // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 105–120.

Савченко В.П. Формирование, разведка и разработка месторождений газа и нефти. М.: Недра, 1977. 413 с.

Симоненко В.Ф. Первичная миграция углеводородов в водорастворенном состоянии и их начальная аккумуляция // Геологические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: Обзор / ВИЭМС. М.: Недра, 1988. 56 с.

- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цивинская Ю.В.* Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 5. С. 608–621.
- Соловьев В.В.* Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-морфологического анализа. Л.: Недра, ЛО, 1978. 110 с.
- Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1986. 332 с.
- Траскин В.Ю., Скворцова З.Н.* Эффект Ребиндера в геодинамических процессах // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 147–164.
- Шварцев С.Л.* Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
- Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А.* Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры // Физика Земли. 2011. № 4. С. 16–38.
- Эз В.В.* Научные труды. М.: ИФЗ РАН, 2009. 234 с.
- Clemont B.H.* Smectite dehydration – its relation to structural development and hydrocarbon accumulation in Northern Gulf of Mexico Basin // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1984. Vol. 68, № 6. P. 673–683.
- Hubbert M.K., Rubey W.W.* Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting // Geol. Soc. Amer. 1959. Vol. 70, № 2. P. 207–214.
- Pili E., Ricard Y., Lardeaux J.-M., Sheppard S.M.F.* Lithospheric shear zones and mantle-crust connections // Tectonophysics, 1997. Vol. 280. P. 15–29.
- Karato S.* The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle // Nature. 1990. Vol. 347. P. 272–273.
- Karato S., Jung H.* Water, partial melting and the origin of the seismic low velocity and high attenuation zone in the upper mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 1998. Vol. 157. P. 193–207.
- Freund F.* On the electrical conductivity structure of the stable continental crust // J. Geodynamics. 2003. Vol. 35. P. 353–388.
- Scholz G.A., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.* Earthquake prediction: A physical basis // Science. 1973. Vol. 181. P. 803–810.

ПРИЛОЖЕНИЕ

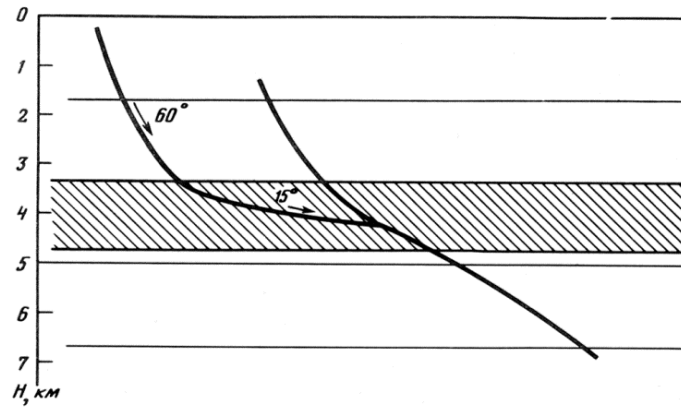


Рис. 1. Положение разрывных нарушений в неогеновых глинистых дельтовых отложениях (штат Техас) по сейсмическим данным. Заштрихована зона дегидратации монтмориллонита [Clemont, 1984]