

ФЛЮИДНЫЕ СИСТЕМЫ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ КОРЫ КАК ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ

И.Г. Киссин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

e-mail Kissin@ifz.ru

В консолидированной земной коре континентов широко распространены субгоризонтальные флюидные системы, которые фиксируются в геофизических полях как электропроводящие и низкоскоростные (волноводные) зоны. Эти системы расположены в средних и нижних частях коры, они имеют значительную протяженность, а их мощность достигает 10 – 15 км (Киссин, 2002). Формирование и длительное сохранение в различных геоструктурах таких систем плохо согласуется с универсальными тенденциями развития коры – гравитационным уплотнением и тектоническим разуплотнением пород. Гравитационное уплотнение пород консолидированной коры происходит в результате растворения минералов на контактах зерен под влиянием сильного одностороннего давления и отложения растворенного вещества на стенках пор (принцип Рикке). В условиях высоких литостатических нагрузок, а также сжимающих тектонических напряжений растворение на контактах приводит к уменьшению пористости вплоть до полной ликвидации связанных пор. При этом под действием литостатического давления нарушаются субгоризонтальные связи между порами. Поскольку связанная пористость определяет электропроводность пород, широкое распространение электропроводящих слоев возможно только при наличии механизма, не допускающего деградации пористости.

Тектоническое разуплотнение пород является следствием воздействия растягивающих или касательных напряжений, что приводит к повышению проницаемости среды. Если в стабильных структурах состояние флюидных систем зависит от уплотнения пород, то в структурах тектонически активных, где трещинно-поровое пространство периодически обновляется, длительному сохранению флюидов препятствует наличие в коре путей эмиграции, прежде всего зон разломов. Пополнение запасов флюидов определяется масштабами и временем протекания процессов метаморфической дегидратации, а также притоком мантийных флюидов. Метаморфизм и поступление летучих из мантии тесно связаны с тектономагматической активизацией. Современная обстановка древних консолидированных структур не способствует развитию этих процессов. Таким образом, возникают серьезные противоречия. Для их устранения необходимо рассматривать условия флюидизации глубинных частей коры с позиций неравновесной термодинамики (Николис, Пригожин, 1979).

Формирование и сохранение флюидонасыщенных слоев и зон происходит при участии процессов самоорганизации. Если допустить, что какая-либо область консолидированной коры представляет собой изолированную систему, то вследствие длительного воздействия литостатической нагрузки при повышенной пластичности пород глубоких горизонтов произойдет уплотнение пород, а открытые поры и трещины будут ликвидированы. Такая область стремится к равновесному состоянию, и в ней не могут сохраниться флюидонасыщенные зоны и связанные с ними неоднородности. Но кора является открытой структурой, в которой осуществляется обмен веществом (флюидами) и энергией (теплом) со смежными оболочками. Применительно к флюидным системам в таком обмене участвуют потоки флюидов и тепла, как входящие в систему извне, так и генерирующиеся (или поглощающиеся) в самой системе под действием метаморфических реакций. В открытой структуре происходит самоорганизация – антиэнтропийный процесс, сопровождающийся поглощением энергии и направленный против равновесия [Руденко, 2000]. К подобным процессам относится и флюидизация

консолидированной коры. Она развивается в поле высоких литостатических давлений и сопровождается разуплотнением пород. Разуплотнение может быть следствием метаморфической дегидратации либо тектонических подвижек. Такая флюидизация и связанное с ней формирование геофизических неоднородностей определяют меру неравновесности и, следовательно, тектонической активности земной коры. Это подтверждается имеющимися фактическими данными: чем более флюидизирована кора, тем сильнее проявляются в ней геоэлектрические и сейсмические неоднородности и выше тектоническая активность геоструктур (Киссин, 2004).

Для флюидных систем консолидированной коры характерна пространственно-временная изменчивость, которая фиксируется по показателям, характеризующим степень флюидонасыщенности пород – электропроводности, скоростям и поглощению сейсмических волн (Киссин, 2002). Процессы самоорганизации, формирующие флюидные системы и геофизические неоднородности, определяют широкое распространение и длительное сохранение таких систем в условиях их сильной изменчивости, которая, однако, не приводит к уничтожению систем. Самоорганизация проявляется в различных геоструктурах, причем, как это показывают имеющиеся данные, отсутствуют принципиальные различия флюидных систем (геофизических неоднородностей) в древних стабильных и молодых активных геоструктурах.

Сейчас уже ясно, что существенное влияние на флюидизацию оказывают два процесса – метаморфическая дегидратация и тектоническое деформирование. Автором была рассмотрена возможность циклических проявлений метаморфической дегидратации пород (Киссин, 1996). Зависимость эндотермической реакции дегидратации от парциального давления выделяющейся воды и температуры приводит к торможению реакции и ее последующей активизации при определенных изменениях этих показателей. Подобный механизм циклической дегидратации, по-видимому, реализуется при наличии возмущений, препятствующих равновесному течению реакции, – изменений потоков тепла, тектонических подвижек и др. Благоприятные условия для этого существуют в нелинейных системах, где очень слабые возмущения приводят к существенным откликам.

Под действием процессов самоорганизации при определенных РТ-условиях возможен переход метаморфических реакций от стадии дегидратации к гидратации и обратно. Если это так, то изменение направления этих реакций в кровле субгоризонтальных флюидонасыщенных тел (волноводов, электропроводящих зон) способствует образованию покрывающих плотных слоев с высокими скоростями и удельными сопротивлениями. Изучение таких переходов может быть сделано при исследованиях метаморфизма методами неравновесной термодинамики (Лепезин и др., 1986).

Наличие в земной коре самоорганизующихся пространственно-временных структур, связанных с распространением флюидов, подтверждается при рассмотрении генезиса зон повышенной сейсмической расслоенности. Эти зоны, обнаруженные в нижней коре многих регионов, представляют собой чередование слоев с повышенными и пониженными скоростями сейсмических волн, и в генезисе таких зон существенная роль принадлежит флюидам (Леонов, 1997). Можно полагать, что сейсмическая расслоенность формировалась в обстановке, когда РТ-условия и тектонический режим способствовали развитию самоорганизующейся системы, определяющей чередование слоев флюидонасыщенных и плотных, в которых развивались процессы метаморфизма – соответственно прогрессивного (дегидратация) и регрессивного (гидратация).

Итак, процессы самоорганизации создают определенный баланс между уплотнением и разуплотнением пород, что является условием длительного сохранения флюидных систем. Самоорганизация флюидных систем, очевидно, проявляется и в древних,

стабильных, и в более молодых, активных структурах. Однако условия такой самоорганизации в этих структурах различны. В стабильных структурах, для которых характерны малые градиенты температуры и давления, флюидный обмен осуществляется очень слабо и преобладает тенденция длительного сохранения флюидов, которые могут иметь очень древний возраст. Так, по данным А.А.Кременецкого и Л.Н.Овчинникова (1986), из глубинных зон, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной, за 1,8 млрд. лет было удалено лишь около половины флюидов, выделенных вследствие дегидратации. В структурах с высокой тектонической или магматической активностью большие градиенты T и P и их значительные изменения во времени приводят к нарушению изоляции резервуаров, содержащих флюиды, и способствуют метаморфической генерации флюидов, их миграции и сравнительно быстрому обновлению.

Механизм самоорганизации при взаимодействии флюидных потоков и тектонических процессов, очевидно, реализуется посредством «взаимного возбуждения»: флюидные потоки активизируют тектонические процессы, а последние приводят к усилению миграции флюидов, причем инициирующим может быть каждый из этих факторов (Киссин, 2006). Зарождение субвертикального элемента флюидной системы обусловлено наличием ослабленной зоны, которая образовалась под действием растягивающих или сдвиговых деформаций. Такая ослабленная зона может служить каналом восходящей миграции глубинных флюидов и областью развития подвижек. И в том, и в другом случае происходит повышение температуры и соответствующая активизация метаморфической дегидратации (декарбонатизации). Распространение протяженных зон, содержащих флюиды с давлением, близким к литостатическому, приводит к уменьшению прочности среды и облегчает дальнейшее развитие сдвиговых деформаций. Флюидные системы – структуры неустойчивые, на что указывает их сильная изменчивость. Эта неустойчивость является одним из условий развития тектонических процессов и в то же время служит отражением таких процессов. Взаимодействие флюидных и тектонических процессов наиболее четко проявляется в развитии сдвиговых деформаций. Взаимное возбуждение здесь происходит по следующей схеме: при выделении тепла в результате подвижек повышается температура, это активизирует метаморфическую дегидратацию пород; последующее выделение воды и рост флюидного давления приводят к снижению эффективного напряжения, что способствует дальнейшему развитию сдвиговых деформаций.

Взаимодействие флюидных потоков и тектонического деформирования происходит с участием нелинейных процессов, причем воздействия флюидов служат основным фактором, определяющим нелинейность. Процессы, развивающиеся в нелинейных структурах, в некотором диапазоне вариаций параметров среды не претерпевают качественных изменений. Но, если вариации параметров достигают определенных пороговых, критических значений, наступают качественные изменения характера процессов (Пригожин, Стенгерс, 1986). Такие изменения среды могут быть очень быстрыми, и нелинейная положительная обратная связь приводит к ускоренному самоподстегивающемуся росту процесса. Эти условия получили название режимов с обострением, когда в открытых нелинейных структурах происходит сверхбыстрое нарастание процессов в течение ограниченного промежутка времени (Князева, Курдюмов, 2003). Нелинейные свойства флюидных систем зависят от PT -условий. Существенная реакция этих систем может быть вызвана слабыми изменениями PT -параметров. При этом критические значения температуры и флюидного давления определяют возможность реализации и направление метаморфических реакций, характер сопутствующих объемных эффектов, а также влияют на емкость порово-трещинного пространства, вмещающего флюиды. Кроме того, критические значения флюидного давления, близкие к литостатическому давлению, способствуют развитию сдвиговых деформаций и актов гидроразрыва, приводящих к удалению избыточной воды и снижению ее давления.

Скорость процессов дегидратации увеличивается под действием эффекта Ребиндера, в результате диспергирования пород до милонитового состояния. Это диспергирование и соответствующее ускорение метаморфических реакций происходит в узких зонах сдвигового течения, где локализуются квазипластические деформации (Ребецкий, 2006). Величина флюидного давления и его влияние на характер сдвиговых деформаций изменяются в зависимости от соотношений между скоростями дилатансии, диспергирования пород и дегидратации. Подобные взаимосвязанные процессы определяют механизм самоорганизации при развитии сдвиговых деформаций.

Представление флюидных систем как открытых диссипативных структур с самоорганизацией позволяет найти приемлемое объяснение условий формирования субгоризонтальных элементов флюидных систем (Киссин, 2006). Некоторые исследователи связывают развитие протяженных электропроводящих и низкоскоростных слоев с подвижками в горизонтальной плоскости, по которым происходят взаимные смещения верхних и нижних слоев земной коры. Такие подвижки рассматривались в ряде работ. По-видимому, именно тектонические подвижки совместно с метаморфическими процессами создают условия для процессов самоорганизации, которые обеспечивают широкое распространение и длительное существование субгоризонтальных элементов флюидных систем. Можно утверждать, что широкое распространение в коре различных геоструктур таких элементов флюидных систем и соответствующих геофизических неоднородностей является наиболее веским доказательством субгоризонтальных движений в средней и нижней частях коры. Таким образом, ослабленный слой, по которому происходят взаимные смещения верхних и нижних слоев земной коры, имеет флюидную природу

Тесные связи между флюидными потоками и тектоническими процессами определяют необходимость их совместного рассмотрения как основных факторов эволюции земной коры. Наиболее значительные современные потоки глубинных флюидов приурочены к тектонически активным структурам с высокой проницаемостью коры. Гораздо более крупные масштабы вертикальной миграции флюидов имели место в геологическом прошлом. Массированные флюидные потоки принимали участие в процессах гранитизации, базификации и трапповом магматизме.

Список литературы

- Киссин И.Г. Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность // *Физика Земли*, 1996, №4, с. 30 - 40.
- Киссин И.Г. Геофизические неоднородности и флюидная система консолидированной земной коры континентов // *Геотектоника*, 2002, №5, с.3 - 18.
- Киссин И.Г. Основные типы флюидных систем консолидированной коры и их связь с тектоническими структурами // *Доклады РАН*, 2004, т.395, №3, с. 381 - 386.
- Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры и геодинамические процессы // *Флюиды и геодинамика*. М.: Наука, 2006, с. 85 - 104.
- Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Особенности неравновесных процессов в открытых диссипативных средах // *Проблемы геофизики XXI в.* М.: Наука, 2003, с.51 - 65.
- Кременецкий А.А., Овчинников Л.Н. *Геохимия глубинных пород*. М.: Наука, 1986, 263 с.
- Леонов Ю.Г. Тектоническая подвижность коры платформ на разных глубинных уровнях // *Геотектоника*, 1997, №4, с. 24 - 41.
- Лепезин Г.Г., Ревердатто В.В., Хлестов В.В. Динамические аспекты метаморфической петрологии // *Геология и геофизика*, 1986, №7, с. 59 - 65.
- Николис Г., Пригожин И. *Самоорганизация в неравновесных системах*. М.: Мир, 1979.
- Пригожин И., Стенгерс И. *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. М.: Мир, 1986.
- Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании // *Флюиды и геодинамика*. М.: Наука, 2006, с.120 - 146.
- Руденко А.П. *Самоорганизация и синергетика* // *Синергетика*, т. 3. М.: Изд. МГУ, 2000, с. 61-99.

