

11. Сазонов В.Н., Викентьева О.В., Огородников В.Н. и др. РЗЭ в колонках пропилитизации, альбитизации, эйситизации и березитизации-лиственитизации пород различной кремнекислотности: эволюция распределения, причины и практическое значение // Литофера. 2006. № 3. С. 108–124.
12. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М: Мир, 1988. 379 с.
13. Холоднов В. В., Феритатер Г.Б., Бородина Н.С., Шардакова Г.Ю., Прибавкин С.В., Шагалов Е.С., Бочарникова Т.Д. гранитоидный магматизм зоны сочленения Урала и Восточно-Европейской платформы (Южный Урал) // Литосфера. 2006. № 3. С. 3–28.
14. Яницкий А.Л., Сергеев О.П. Бакальские железорудные месторождения и их генезис. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 112 с.
15. Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N. et al. Geochemical characterization of Precambrian magmatic suites of the Southeastern margin of the East European craton, Southern Urals, Russia // Геологический сборник № 5. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2006. С. 119–161.

О некоторых общих закономерностях упругих свойств геологической среды

Кузин А. М.

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, e-mail: amkouzin@yandex.ru

Уже много десятилетий проницаемые зоны земной коры и мантии привлекают к себе не ослабевающий интерес исследователей в различных разделах геологической науки. С ними непосредственно связаны процессы вулканизма, землетрясений и образования месторождений полезных ископаемых. В тоже время несопоставимо меньшее внимание уделяется изучению взаимосвязи этих процессов с механически жесткими геологическими образованиями. Они наблюдаются в диапазоне длин волн от сейсмологического (высокоскоростные зоны, прослеживаемые на глубины более 1000 км) до ультразвукового. Под всеми континентами в верхней мантии присутствуют высокоскоростные аномалии скорости, уходящие на глубину порядка 300–400 км и особенно четко фиксирующиеся под древними платформами. Их образование связывается с миграцией флюидных потоков (Н.И. Павленкова, 2006).

Блоковость строения земной коры еще 80-е годы прошлого столетия была доказана Г.В. Краснопевцевой и Ю.К. Щукиным для нефтеносных областей и районов повышенной сейсмичности по значениям отклонений времен прихода первых волн в методе ГСЗ.

Анализ и обобщение данных позволили прийти к выводу о фундаментальной роли механически жестких образований в геологических процессах: – на нефтеносных и рудоносных блоках фиксируются нетехногенные землетрясения (А.В. Егоркин 1996); – большинство очагов землетрясений расположено на границе жестких блоков (Н.В. Шебалин, 1976); – все месторождения флюидного генезиса залегают на жестких образованиях или на их границах (А.М. Кузин, 1994).

Физической основой для объяснения этой роли может служить геомеханическая модель «твердого тела со структурой» (В.Н. Родионов, И.А. Сизов, 1986). Помимо процессов накопления и диссипации упругой энергии при высокой скорости деформации происходит увеличение жесткости твердого тела, а в некоторых случаях, и увеличение его эффективной прочности, обеспечивающей его устойчивость по отношению к волнам деформаций и напряжений. В статическом состоянии жесткое тело формирует разность вертикальных напряжений между его кровлей и подошвой, что создает термодинамический градиент и, соответственно, миграционный потенциал для флюидных потоков вдоль граничной зоны жесткого тела и вмещающей среды.

Эти свойства жесткого тела позволяют объяснить миграцию магматических каналов. Из анализа данных сейсмической томографии (Л.Б. Славина и др., 2001, В.Б. Пийп и Р.М. Гылызов, 2005) магматические каналы расположены на периферии области низкой скорости и тяготеют к границам высокоскоростных блоков. При этом нужно отметить, что в одном случае это континентальный тип коры, в другом океанический.

Те же свойства жесткого тела могут объяснить приуроченность месторождений флюидного генезиса к узлам пересечения разрывных нарушений. Так, по данным физического моделирования процесса образования разломов (В.В. Ружич, 1986), в том случае, когда развитие продольных трещин тормозилось поперечными трещинами, для модели наблюдалось явление упрочнения; ее разрушение происходило при больших на 8–15% напряжениях по сравнению с развитием одних продольных. Упрочнение происходило на фоне увеличения количества трещин. Было установлено, что наличие поперечных трещин ведет к упрочнению модели, затрудняя развитие продольных трещин и повышая запас упругой энергии, а на стадии разрушения увеличивая значения импульсов высвобождаемой энергии. Процессы накопления и диссипации упругой энергии жестким телом приводят к уменьшению его объема.

С дегазацией недр связаны зоны объемного катаклаза, трубок взрыва, выбросы угля. Б.М. Валяевым (1985, 1987) было показано, что помимо таких механизмов влияния поровых флюидов на процессы деформации как снятие флюидом нормальных напряжений, действующих на скелет породы, и физико-химического воздействия поровых флюидов на основе эффекта Ребиндера (меняющих условия сдвига), под флюидоупором могут формироваться очаги флюидизации, аккумулирующие упругую энергию за счет избыточного флюидного давления (L.H. Robinson, 1959; Trollope, Brown, 1966). Особенно высокое давление во флюиде может возникать за счет гидравлической взаимосвязи очагов флюидизации, расположенных на разных гипсометрических уровнях и/или иных тектонических напряжениях, может происходить направленная передача литостатических и тектонических напряжений.

Модель образования очага флюидизации позволяет на сейсмическом разрезе объяснить распределение скоростей продольных и поперечных волн региональных многоволновых наблюдений. Например, детально описанные Н.К. Булиным и А.В. Егоркиным (2000) домены, лежащие на одной глубине и характеризующиеся резким различием по параметру отношения скорости продольной волны к скорости поперечной.

Флюидизация наиболее эффективный способ снятия напряжений при землетрясениях, взрывных извержениях вулканов (Б.М. Валяев, 1987). Так, наиболее сильные землетрясения с магнитудой 6,5–6,8 баллов происходят в областях, где флюидное давление более 90% от литостатического (Ю.Л. Ребецкий, 2007).

Образование зон упрочнения в среде может происходить не только при неупругом деформировании, но и при флюидизации. С позиции геомеханики (И.П. Добровольский, 1991) за счет быстрого увеличения трещинно-пористого пространства флюидное давление падает, что приводит к увеличению эффективного давления и уменьшению кулоновых напряжений при сохраняющемся уровне девиаторных напряжений. За счет разрыхления здесь происходит некоторое уменьшение внутреннего сцепления ненарушенных участков горной породы. Из-за усилившегося всестороннего обжатия данная область упрочняется, что позволяет рассматривать ее в качестве жесткого включения.

Согласно теории динамики подвижных физико-химических барьеров (В.С. Голубев, 1981), при взаимодействии воздействующего на породу потока флюида с более высоким или более низким молярным распределением кислорода, чем в породе, и заключенного в ней флюида, возникает окислительно-восстановительный геохимический барьер, который перемещается в направлении течения флюида. По данным моделирования взаимодействия потоков магматогенных флюидов и мантийных пород над границами отмирающих астенолинз, при давлении 45–20 кбар наблюдается образование сменяющих друг друга аномальных по плотности областей метасоматических изменений (В.Н. Шарапов, 2005).

При исследованиях гидротермально-метасоматических процессов, их зональности и физико-химических свойств (Р.В. Голева, 1984) было показано, что при натриево-метасоматическом преобразовании, ведущем к альбитизации, резко изменяются упругие свойства гранитов, возрастают модуль Юнга и пористость, а коэффициент Пуассона уменьшается. Прочность увеличивается в промежуточной зоне (микроклин-плагиоклаз-хлорит-эпидотовая) на 10% и во внешней зоне (кварц-микроклин-плагиоклаз-хлорит-мусковитовая) на 25%.

С альбитизацией связаны многие рудные месторождения и прежде всего урана. Согласно В.А. Крупенникову (1986) образование рудоносных альбититов связано с взрывным механизмом. Основанием для этого вывода послужили следующие фактические данные: – отсутствие признаков сколько-нибудь существенных перемещений вдоль крупных рудоконтролирующих разломов в период рудообразования; – изометричная или эллипсовидная в плане и нередко воронкообразная (или каплевидная) в разрезе форма альбититовых тел, часто лишь отдаленно согласующаяся с особенностями структуры месторождения; – резкое выклинивание альбититовых тел вверх по восстанию, необъяснимое с тектонических (структурных) позиций; – отсутствие внутри альбититовых тел тектонических нарушений, с которыми можно связать образование катаклазитов; – хаотичность расположения в контуре катаклазитов участков интенсивного катаклаза и микробрекчирования; – ограничение контуров катаклазитов границами метасоматических ореолов. Высокие значения давления альбитизирующего раствора, достигающие $2,3 \cdot 10^8$ – $2,5 \cdot 10^8$ Па (А.И. Тугаринова и В.Б. Наумова) и высокое, до 300 г/кг породы содержание углекислоты (С.В. Кузнецова и Н.М. Гостяева) дали основание считать, что наиболее реальным механизмом формирования катаклазитов является взрывной, обусловленный высоким давлением флюида, а также газовой его составляющей. Следовательно, при взрывном механизме формирования катаклазитов становится очевидной важная роль углекислоты в альбитизирующих растворах: рудоносный катаклаз и формирование рудных залежей могли происходить только в тех случаях, когда содержание и давление углекислоты в растворе достигали величин, достаточных для проявления локального газоразрыва пород. Это находит подтверждение в результатах интерпретации сейсмических данных.

Исследования скорости распространения продольных и поперечных волн для территории Украинского кристаллического щита и Кокшетаузкого кристаллического массива и его обрамления (Сев. Казахстан) в зонах разрывных нарушений показали, что во многих случаях интервалы профилей, на которых надежно выделяются области аномального отношения V_s/V_p (от 0,65 до 0,7 и более), связаны с зонами гидротермально-метасоматически измененных пород (А.М. Кузин, 1994, 2004).

Существенную роль играют соединения углерода при образовании взрывоопасных зон в угольных шахтах. Они происходят только там, где имеются разрывные нарушения, флюидоизмененные породы (зоны упрочнения или бронирования) и повышенные концентрации углеводородов (В.Н. Труфанов, М.И. Гамов и др. 2004). Экспериментальные исследования фильтрации при деформации выбросоопасных и невыбросоопасных песчаников, выполненные А.Н. Ставрогиным и Б.Г. Тарасовым (2001) показали, что через области деформации у невыбросоопасных песчаников коэффициент фильтрация (K_f) при всех уровнях бокового давления возрастает на 3 и более десятичных порядка. У выбросоопасных песчаников наибольшие увеличения K_f при $\sigma_2 = 25$ и 50 МПа, составляют около одного десятичного порядка, при небольших боковых давлениях K_f увеличивается менее чем в два раза. Это означает, что области упрочнения в зонах разрывных нарушений экранируют газообразные флюиды.

Классическим примером тесной корреляции механически жесткого тела, разрывного нарушения и месторождений флюидного генезиса можно назвать рифогенные структуры. По данным Г.М. Авчяна для газонасыщенных рифогенных известняков значения коэффициента Пуассона могут достигать отрицательных значений (от –0,3 до 0,3). Анализ соотношений пористости и литоинградиентов в рифах позволил Н.С. Скрипченко (1989) сделать вывод о важнейшем значении пор строматактисового типа для проницаемости растворов. В тоже время в этих порках апофизы выступают как шпильное продолжение купольной поверхности строматактисов, образуя квазиконическую форму пор. По данным реологических испытаний образцов горных пород (З.И. Стаховская, 1971), породы с квазиконической формой пустотного пространства обладают большей устойчивостью к деформациям по сравнению с другими формами. Необходимо отметить, что к рифам приурочены не только месторождения углеводородов, но и рудные месторождения.

Одним из основных критериев прогнозирования рифогенных тел по данным многоволновой сейсморазведки является аномально высокое отношение V_s/V_p (V_s – скорость поперечных, V_p – продольных волн). Значительное число ловушек углеводородов (по данным многоволновой сейсмо-

разведки), например в Татарстане представлены коллекторами, образованными мелкопористыми механически жесткими породами. Так, по результатам интерпретации данных сейсморазведки 3D/3C (В.А. Екименко, 2006) в песчаниках, залегающих в кровле залежи, значения скорости поперечных волн повышены, в отличие от продольных.

Относительно высокое соотношение V_s/V_p сохраняется для тектонических блоков, подстилающих нефтяные и рудные месторождения при сейсмических наблюдениях в масштабах длин волн ГСЗ и КМПВ: Ромашкинское, Карачаганакское – углеводороды, рудные Норильское и Талнахское и др. месторождения. Причем даже в пределах одного региона и одного вида полезного ископаемого механически жесткие геологические образования могут иметь разный генезис, например, их различный генезис может быть проиллюстрирован на примере крупнейших месторождений углеводородов, залегающих в обрамлении Прикаспийской впадины: Карачаганакское – органогенная постройка атоллоидного типа, Астраханское – крупное пластовое карбонатное тело.

В дополнение к изложенному, необходимо остановиться на общих закономерностях и свойствах организации геологического пространства. Приведенное обобщение позволяет прийти к выводу, что помимо общих свойств и закономерностей, определяющих эволюцию земной коры на макроуровне, существуют общие свойства и закономерности на микроуровне. В эволюции земной коры главенствующая роль принадлежит кислороду, одному из самых распространенных в земной коре химических элементов (С.М. Макеев, 1999). Его физико-химические свойства определяют фундаментальные свойства геологического пространства. Низкая поляризуемость атомов кислорода обуславливает упругий и электромагнитный способы передачи энергии. Кислород организует химические связи во всех породообразующих минералах и входит в химический состав воды, создавая тем самым единую взаимосвязь свойств между горными породами и водными растворами.

Водородные связи определяют физико-химические свойства воды и соответственно – ее растворов. Экспериментально доказано (А.Г. Каличев, Ю.Е. Горбатов, 1998) наличие водородных связей даже при температурах и давлениях выше критической точки. Вода обеспечивает самый высокий по теплопроводности коэффициент полезного действия в функционировании природной системы. Кислородными и водородными связями объясняется то, что на заключительных стадиях развития различных геологических процессов (литогенетические преобразования осадков, гидротермально-метасоматические изменения, пневматолитиз, неупругое деформирование) наблюдаются по сути идентичные, независимые от геохронологии и пространственного положения процессов преобразования вещественного состава и структуры.

По сейсмическим данным, при общей закономерности увеличения скорости с глубиной, от мантии и до самых верхних горизонтов земной коры фиксируется сложное зональное (полizonальное) распределение упругих свойств геологической среды, на фоне чередования слоев с относительно повышенной и пониженной скоростью сейсмических волн. Отмечается корреляция нефтеносных и рудоносных районов с границами мантийных скоростных аномалий, а для земной коры приуроченность месторождений к границам механически жестких (по V_s/V_p) или плотных (по V_p) блоков, устойчивых к воздействию волн деформаций и напряжений (А.М. Кузин, 1993, 1994, 1995; А.В. Егоркин, 1995).

Учитывая, что литосфера это открытая нелинейная автоколебательная система с фрактально-иерархической структурой, обменивающаяся с окружающей средой веществом и энергией, изменяющая свои свойства за счет внутренних и внешних процессов в пространстве и времени, с гармоническими, антигармоническими, трендовыми вариациями состояния среды (М.А. Садовский, В.И. Уломов, Л.Н. Рыкунов, А.Г. Гамбурцев). Отсюда, естественно, что в рамках функционирования единой системы, при преобладающем типе взаимосвязи ее элементов будет преобладать совершенно определенный набор ее свойств и организации.

Перечисленные свойства геологической среды позволяют formalизовать их в виде общего ее свойства – свойства «редупликации», подразумевающей единую общую природу в преобразовании вещества и структуры геологической среды (А.М. Кузин, 2006). Понимание этого общего свойства необходимо для интерпретации данных сейсмического метода