

А. Ю. Кисин
Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург
kissin@igg.uran.ru

Роль блоковой складчатости земной коры в генерации и распределении флюидов

Проблема деформаций земной коры существует столько, сколько существует само понятие коры как внешней твердой оболочки Земли. По этому вопросу высказано много идей и гипотез, в т.ч. диаметрально противоположных. К середине прошлого века сложилось убеждение, что складки продольного изгиба земной коры невозможны [Рамберг, 1985 и др.]. Тем не менее, исследования по этой проблеме продолжались [Коротаев и др., 2004; Макаров, 1977; Никишин, 2002; Хаин, Яблонская, 1997 и др.]. Интерес к ней подогревается и тем, что все месторождения полезных ископаемых находятся в земной коре. Для образования любого месторождения нужны особые условия, и главное – энергия. В земной коре дополнительная энергия может появиться, вероятно, либо из мантии, либо за счет тектонических процессов.

Автором в результате исследований гранито-гнейсовых комплексов Южного и Среднего Урала разработана модель блоковой складчатости, в которой задействована преимущественно тектоническая энергия. Блоковая складчатость земной коры – это

особый вид деформаций, когда складки продольного изгиба имеют вид блоков, разделенных надвигами встречного падения. Она передает тектоническую энергию на расстояния, а изгибы распределяют ее и фокусируют на относительно небольшие объемы, создавая резко метастабильную систему.

Необходимые условия возникновения блоковой складчатости следующие.

Реологическая и тектоническая расслоенность. В 60–80-х гг. прошлого века в Геологическом институте РАН (г. Москва) была разработана концепция тектонически и реологически расслоенной литосферы (включая земную кору). По реологическим свойствам земная кора условно разделена на верхнюю (упругую) и нижнюю (пластичную). При горизонтальных смещениях верхней коры в нижней коре происходят горизонтальные срывы, вызывающие ее тектоническую расслоенность [Тектоническая..., 1980; Леонов, 1997]. Этого достаточно для возникновения блоковой складчатости при одноосном горизонтальном сжатии.

Тектонопара «надвиг-продольный изгиб» обеспечивает развитие блоковой складчатости. Если на каком-то участке земная кора испытает ориентированное горизонтальное давление со стороны индентора, то на этом участке возникнут условия одноосного горизонтального сжатия. Упругая верхняя кора передает напряжения на расстояния, а напряженный участок испытывает горизонтальное сокращение по данной оси. В литературе рассматривается несколько способов горизонтального сокращения коры и явное предпочтение отдано шарьяжно-надвиговой тектонике. Однако при всей кажущейся простоте воспроизвести надвиг экспериментально, используя стеклянные пластинки, оказалось трудной задачей. Проблема заключается в том, что движение в плоскости надвига вызывает смещение висячего блока вверх и требует его отрыва от подстилающих толщ. Но природа не терпит пустоты, и такое смещение становится невозможным. В результате этого начинает работать пара разнонаправленных изгибающих моментов: в висячем боку надвига образуется отрицательный изгиб, а в лежачем – положительный. Таким образом, развитие надвига в земной коре невозможно без изгиба.

Справедлива и обратная зависимость: потеря изгибной устойчивости упругой коры при горизонтальном сжатии не может привести к образованию синусоидальной складчатости продольного изгиба без надвига, поскольку развитию арки положительного изгиба препятствуют силы гравитации, а отрицательного изгиба – силы Архимеда, направленные в противоположные стороны. Эти две силы частично уравновешиваются формированием надвига.

Но даже при наличии системы надвигов встречного падения и изгибающих моментов – развитие синусоидальных изгибов коры остается невозможным, поскольку деформации должны снимать напряжения, а не создавать их. Силы гравитации и Архимедовы силы, хотя и в ослабленном виде, продолжают противодействовать образованию синусоидального изгиба. В результате изгибы формируются за счет сложных деформаций, без образования арки со всеми атрибутами продольного изгиба: парные изгибающие моменты, нейтральная поверхность, на которой меняются знаки напряжений; напряжения прямо пропорциональны расстоянию до нейтральной поверхности (рис.). Только способ релаксации этой напряженной системы – иной, предельно энергоемкий. Горизонтальное сокращение коры при таком изгибе возможно только за счет зоны сжатия, поэтому нейтральная поверхность максимально смещена в сторону зоны растяжения. Блоковой складчатости присущ принцип унаследованности.

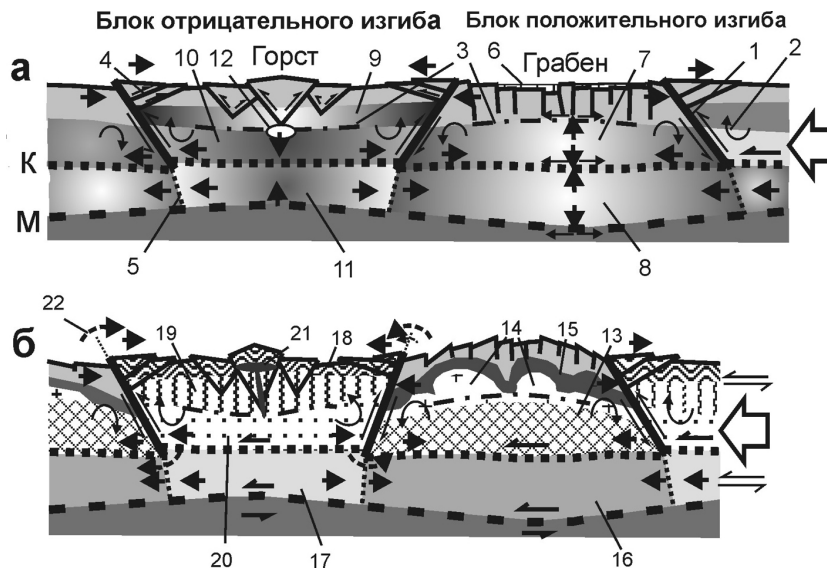


Рис. Модель блоковой складчатости

а – основные элементы общекоревой складчатости; б – структурно-вещественные преобразования коры при изгибе (незавершенная складчатость); 1 – надвиг; 2 – изгибающие моменты; 3 – нейтральная поверхность; 4 – клинодислокации и/или околондвиговые антиклинальные вздутия (валы); 5 – зона пластического сдвига; 6 – зона растяжения и синскладчатые осадочные образования; 7–8 – зона сжатия в блоке положительного изгиба (7 – в верхней коре; 8 – то же, в нижней коре); 9 – зона сжатия в блоке отрицательного изгиба; 10–11 – зона растяжения в блоке отрицательного изгиба (10 – верхней коре; 11 – то же, в нижней коре); 12 – магматический очаг; 13 – область разогрева и высокобарического метаморфизма; 14 – куполовидные структуры; 15 – высокоградиентный зональный метаморфизм; 16 – область разогрева и высокобарического метаморфизма в нижней коре; 17 – область разогрева и низкобарического метаморфизма; 18 – область мегабрекчирования и мелкой складчатости; 19 – область разогрева и зеленосланцевого метаморфизма; 20 – область разогрева и низкобарического (зеленокаменного) метаморфизма; 21 – многофазные малые бескорневые интрузии и кольцевые дайки; 22 – направление разворота плоскости надвига в результате изгиба. Пояснения в тексте.

В блоке положительного изгиба коры зона сжатия расположена ниже нейтральной поверхности. Здесь действует **прямой градиент стрессовых напряжений**: напряжения возрастают от дневной поверхности к подошве коры [Кисин, Коротеев, 2009]. В нижней части коры, в условиях повышенных температур и всестороннего давления, преобладают пластические деформации. Закрывается трещинно-пористое пространство и наиболее подвижный материал (в газообразной и жидкой форме, объединяемый термином «флюид») начинает перемещаться в направлении максимального падения давления, т.е. вверх. Механическая энергия сжатия трансформируется в тепловую, приводя к быстрому разогреву больших объемов горных пород. Часть тепловой энергии переносится флюидами на верхние горизонты коры, что может вызвать ранний метаморфизм пород при низких РТ-условиях. Рост давления и температуры в нижней части коры сопровождается высокобарическим метаморфизмом, растворением, реакциями дегидратации, фазовыми переходами, имеющими отрицательные объемные эффекты. Преобладают восстановленные флюиды. Температурный

градиент создает и градиентное рН-поле, что также способствует перераспределению ряда петрогенных и рудных компонентов. Имеет место региональная гранитизация. Несмотря на сильный разогрев нижней части коры, магматический расплав не возникает, поскольку горные породы при разогреве начинают пластически деформироваться раньше, чем достигаются условия плавления. Пластичный разогретый материал выжимается вверх, образуя купольные структуры. Связь с зоной сжатия через колонну пластичных пород обеспечивает повышенные давления и температуры в ядрах купольных структур, которые становятся центрами зонального высокоградного метаморфизма на верхних горизонтах коры. Рост купольных структур имеет свою специфику, из-за чего они принимают грибовидную форму.

Минерагению блоков положительного изгиба определяют процессы гранитизации, перерабатывающие огромные объемы горных пород, что сопровождается выносом в околокупольное пространство ряда рудных и нерудных компонентов (Fe, Au, Si, Mg и др.). В ядрах куполовидных структур накапливаются флюиды, обогащенные легколетучими (фторофильными) элементами (Be, Li, Sn, Ta, Nb и др.). Снятие тектонических напряжений сопровождается падением давления в ядрах куполовидных структур, вызывающем процессы анатексиса и ультраметаморфизма. Расплавы, наиболее богатые летучими компонентами, формируют дайковый комплекс гранитов и пегматитов (с редкометалльной, слюдяной, кварцевой и самоцветной минерализацией), приуроченный к трещинам отрыва и скалывания в межкупольных структурах. В надкупольном пространстве формируется кварцево-жильное поле с горным хрусталем. Имеют место гидротермально-метасоматические процессы (альбитизация, грейзенизация, гидротермально-жильное заполнение трещинно-пустотного пространства), эволюционирующие в ходе длительной посттектонической релаксации системы. Таким образом, блоки положительного изгиба специализированы на нерудные полезные ископаемые, золото, редкие элементы.

В блоке отрицательного изгиба максимальные стрессовые напряжения приходятся на область повышенной трещиноватости пород с низкими литостатическими давлениями и температурами (рис.). Резко преобладают хрупкие деформации горных пород. Имеет место вертикальная зональность деформаций пород, зависящая от литостатического давления: зона площадных брекчий, мегабрекчий, пологих надвигов и взбросов, с глубиной переходящая в зону бескорневой складчатости. Главную роль играет обратный (запирающий) градиент стрессовых напряжений. Для обеспечения образования мелкой складчатости в этих условиях вполне достаточно понятия «слоистая среда», поскольку нет потребности в передаче напряжений на расстояние через «компетентные» слои. Изгиб обеспечивается горизонтальным сокращением зоны сжатия, которое на верхних горизонтах коры реализуется посредством тектонических клиньев, формирующих осевой горст (систему горстов, осевое поднятие, осевое антиклинальное вздутие), способных частично решить проблему свободного пространства. Выжимание тектонического клина вверх в значительной степени снимает напряжения во всей области зоны сжатия изгиба.

С глубиной, с ростом всестороннего давления и температуры, а также уменьшением скорости деформаций, способность пород к хрупко-пластическим и пластическим деформациям возрастает. Накопление флюидов, запертых обратным градиентом, также способствует росту пластичности пород. Часть механической энергии сжатия трансформируется в тепловую энергию, вызывая разогрев пород и нарушение температурного баланса. Это тепло, совместно со стрессовым давлением, может быть причиной регионального метаморфизма пород, достигающего зеленосланцевой фации.

Хрупко-пластические и пластические деформации в зоне растяжения сопровождаются повышенным выделением тепловой энергии, что вызывает разогрев пород. Снижение всестороннего давления и повышение температуры дестабилизирует систему и может привести к зеленокаменному метаморфизму пород. В подошве упрюгой коры метаморфизм пород может достигать эпидот-амфиболитовой фации, а, возможно, и амфиболитовой фации пониженных давлений. Кроме того, надо принять во внимание действие обратного градиента, запрещающего подъем ювенильных вод и флюидов, т.е. перекрывающего конвективный (наиболее эффективный) механизм отвода тепла, что ведет к накоплению тепловой энергии, поступающей из мантии и энергии тектонического происхождения. Возможно, обратный градиент играет главную роль в разогреве пород зоны растяжения данного блока.

Нижняя кора испытывает горизонтальное растяжение, пластически деформируется и разогревается. Толщина ее несколько уменьшается, а граница Мохо смещается вверх. Породы нижней коры испытывают метаморфические преобразования в условиях роста температуры и снижения всестороннего давления. Весьма вероятны реакции гидратации. Снижение всестороннего давления способствует обособлению флюидной фазы, а рост температуры повышает флюидное давление. Обратный градиент удерживает флюиды на глубине, что ведет к их перегреву и обогащению рудным веществом (хлорофильными, халькофильными, сидерофильными элементами). Хотя разогрев пород в блоке отрицательного изгиба за счет тектонического фактора менее значительный, чем в блоке положительного изгиба, тем не менее здесь высока вероятность возникновения магматических очагов. Объясняется это действием обратного градиента и аккумуляцией тепловой энергии. В этих условиях можно ожидать значительный рост температур и возникновение «запертых» магматических очагов. При сильном перегреве магмы или временном ослаблении стрессовых напряжений происходит прорыв магматического расплава в горстовую структуру. Этот процесс может повториться неоднократно, в результате чего формируются многофазные бескорневые малые интрузии и кольцевые дайки (рис.). Обогащение рудным веществом магматических расплавов и рудоносных флюидов осуществляется за счет пород окружения и рудного вещества, поступающего из нижней коры и верхней мантии. Принимая во внимание принцип унаследованности, следует считать, что в разрез блока могут входить толщи эвапоритов, терригенно-осадочных, вулканогенно-осадочных и вулканогенных пород, погребенные рудные месторождения и тому подобное, что сказывается на его рудной специализации.

При переходе системы к регрессивному этапу обратный градиент исчезает. В верхней части коры открываются трещины. Зона брекчий, мегабрекчий и объемной трещиноватости становится благоприятной средой для циркуляции метеорных и захороненных морских вод. В нижней части блока возрастает всестороннее давление. Появляется прямой градиент напряжений, связанный с литостатической нагрузкой. Магматические очаги получают возможность полностью разгрузиться в область осевого клина. Появляется возможность вертикальной миграции рудоносных флюидов. Давление перегретого флюида может превышать литостатическое давление, что вызывает образование гидроразрывов, брекчирование и диспергирование пород по фронту их движения с формированием трубообразных и дайковых тел рудных брекчий, иногда называемых взрывными, флюидизационными, флюидизированными гидроструктурами [Cloos, 1941 и др.]. Такие брекчии часто содержат в той или иной степени окатанный материал, что делает их порой неотличимыми от конгломератов.

Специфику оруденения брекчий определяет вещественный состав коры в области формирования и циркуляции рудоносных флюидов, и верхняя мантия.

Магматический расплав и флюиды переносят на верхние горизонты коры и часть тепловой энергии, что вызывает здесь метаморфические преобразования пород, возможно, даже более интенсивные, чем на прогрессивном этапе, но неравномерные, проявленные только на пути движения теплоносителей. Метаморфизм пород протекает при активном участии флюидов. На карбонатные породы накладываются скарновые процессы (инфильтрационные скарны). Наиболее крупные трещины скалывания играют роль рудоподводящих каналов. В зоне объемной трещиноватости, брекчирования и мегабрекчирования происходит смешение глубинных флюидов с метеорными и морскими захороненными водами, их резкое охлаждение, изменение рН среды и окислительно-восстановительного потенциала, рудоотложение в трещинно-пустотном пространстве. Большое развитие получают жильные образования различного минерального состава. Часть рудного вещества переносится и малыми интрузиями. Перенесенная ими тепловая энергия создает локальные контрастные температурные аномалии и усиленную циркуляцию смешанных вод. При охлаждении массивов образуется дополнительное трещинно-пустотное пространство, благоприятное для рудоотложения. Регрессивный этап в блоке отрицательного изгиба является ответственным за рудообразование.

Таким образом, блоковая складчатость генерирует и контролирует флюидные системы на всех этапах своего развития. Минерагения блоков во многом зависит от типа и состава коры, геологической предыстории, но, в целом, прослеживается тенденция специализации блоков положительного изгиба на нерудное сырье, редкие металлы и золото, а блоков отрицательного изгиба – на различные рудные месторождения.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционных проектов №№ 12-И-5-2060 и 12-И-5-2068 УрО РАН.

Литература

- Кисин А. Ю.* Закономерности размещения и прогноз месторождений полезных ископаемых на основе модели блоковой складчатости. Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Пермь, 2009. 454 с.
- Кисин А. Ю., Коротеев В. А.* Градиенты стрессовых напряжений как причина перемещения вещества при общекоровой складчатости // Доклады АН. 2009. Т. 424. № 1. С. 67–70.
- Кортаев М. В., Еришов А. В., Фокин П. А.* Синкомпрессионная литосферная складчатость Восточно-Европейской платформы // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2004. № 1. С. 3–10.
- Леонов Ю. Г.* Тектоническая подвижность коры платформ на разных глубинных уровнях // Геотектоника. 1997. № 4. С. 3–23.
- Макаров В. И.* Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М.: Наука, 1977. 171 с.
- Никишин А. М.* Тектонические обстановки. Внутриплитные и окраинноплитные процессы. Учебник. М.: МГУ, 2002. 366 с.
- Рамберг Х.* Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Недра, 1985. 399 с.
- Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования. М.: Наука, 1990. 293 с.
- Хаин В. Е., Яблонская Н. А.* Структурный рисунок Альпийско-Гималайского и Центрально-Азиатского горных поясов как отражение верхнекорových упруго-пластических деформаций // Доклады АН. 1997. Т. 353. № 5. С. 655–658.
- Cloos H.* Bau und Taetigkeit von Tuffschloten // Geologische Rundschau, 1941. Band XXXII. Heft 6-7. S. 708–800.