

6. Кириллук В.П. Об особенностях строения и эволюции раннедокембрийского фундамента щитов древних платформ (*опыт геотектонического анализа*) // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Материалы XXXVIII Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2005. С. 281 -285.
7. Кириллук В.П. Геотектоническая периодизация раннего докембрия // Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2007. С. 292-296.
8. Красный Л.И. Геоблоки // Геотектоника. 1967. № 5. С. 103-120.
9. Красный Л.И. Проблемы тектонической систематики. М.: Недра, 1972. 152 с.
10. Красный Л.И. Глобальная система геоблоков. М.: Недра, 1984. 224 с.
11. Красный Л.И. Основы учения о блоковой (геоблоковой) делимости литосферы // Геол. журн. 1993, № 3. С. 4-13.
12. Силицын А.В. Региональная тектоника и металлогения раннего докембрия. Л.: Наука, Лен. отд., 1990. 491 с.
13. Шульдинер В.И. Докембрийский фундамент Тихоокеанского пояса и обрамляющих платформ. М.: Недра, 1982. 226 с.
14. Starostenko V.I., Pashkevych I.K., Kutas R.I. Deep-Seated Structure of the Ukrainian Shield // Mineral. Journ. (Ukraine). 2002. 24. № 2/3. P. 111-121.

ОБЩЕКОРОВАЯ СКЛАДЧАТОСТЬ – УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

Кисин А. Ю.

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

Благодаря быстрому и динамичному развитию геофизических методов исследований за последние 100 лет, представления о глубинном строении земной коры качественно изменились. На основании преимущественно геофизических исследований строятся различные модели многослойной коры, выявляются разноранговые неоднородности и признаки упорядоченности. В последние десятилетия в тектонофизике возникло и активно развивается направление на изучение структурированных сред [2, 3 и др.]. С этими представлениями тесно переплетаются разработки М.Г. Леонова в области «реидной» тектоники. Показано, что структурирование среды – явление многоуровневое. Деформация структурированных сред протекает по своим законам и структурированность среды при этом сохраняется. Концентраторами напряжений в структурированных средах выступают отдельные домены, вызывающие неравномерную деформацию. Известно, что при горизонтальном ориентированном сжатии земная кора деформируется. В свете выше сказанного, было бы нелогично ожидать, что деформации коры проходят без системно и ограничиваются лишь разрывными нарушениями и надвиганием тектонических пластин одна на другую. Логичней ожидать, что деформации коры породят новую (или видоизменят старую) структурированную область. Складчатость, вероятно, является идеальным кандидатом на эту роль.

Еще в 1922 г. Э. Арган [1] выдвинул идею о **подкорковых течениях** и существовании **складок основания и складок чехла**. Идея приобрела сторонников, но не приобрела признания и не получила соответствующего теоретического развития. Развиваемая здесь модель общекоровой складчатости принципиально отличается от модели Э. Аргана, поскольку в основе ее лежат ориентированные горизонтальные напряжения в земной коре и изгибная тектоника. Лучше всего она ложится на концепцию реологически расслоенной коры, разрабатываемую в ГИН РАН. В этом случае верхняя (упругая) кора подходит под определение «компетентный слой», а нижняя (пластичная) кора и атмосфера + гидросфера подходят под определение «некомпетентные слои». В результате этого мы имеем классическую слоистую модель, способную к продольному изгибу. Потеря изгибной устойчивости упругой коры при горизонтальном ориентированном сжатии имеет место при наличии любой крупной неоднородности. А поскольку земная кора является внешней, самой тонкой и самой анизотропной из твердых оболочек Земли, то можно утверждать, что **изгибная неустойчивость коры уже заложена в ее анизотропии**. Следовательно, анизотропия коры определяет знак изгиба (положительные изгибы на выступах фундамента, а отрицательные – на впадинах, рифтах), что хорошо согласовывается с принципом унаследованности. Классической тектонопарой при общекоровой складчатости являются «надвиг + продольный изгиб», которые не могут существовать друг без друга (как и общекоровая складчатость без них). Благодаря этой тектонопаре – изгибающие моменты являются **максимальными** изначально, а угол кривизны изгиба начинается, примерно, с 90^0 (!). То есть, изгиб стартует уже с небольшим радиусом, что сильно уменьшает длину волны (вероятно, в несколько раз). Энергия фокусируется на минимально возможном объеме. Градиенты напряжений максимальные, из возможных. Это чрезвычайно важно для функционирования модели общекоровой складчатости, как это будет видно ниже. В итоге **деформации изгиба осуществляются практически при любых сжимающих напряжениях**. Меняется только скорость деформации, что отражается на конечном результате.

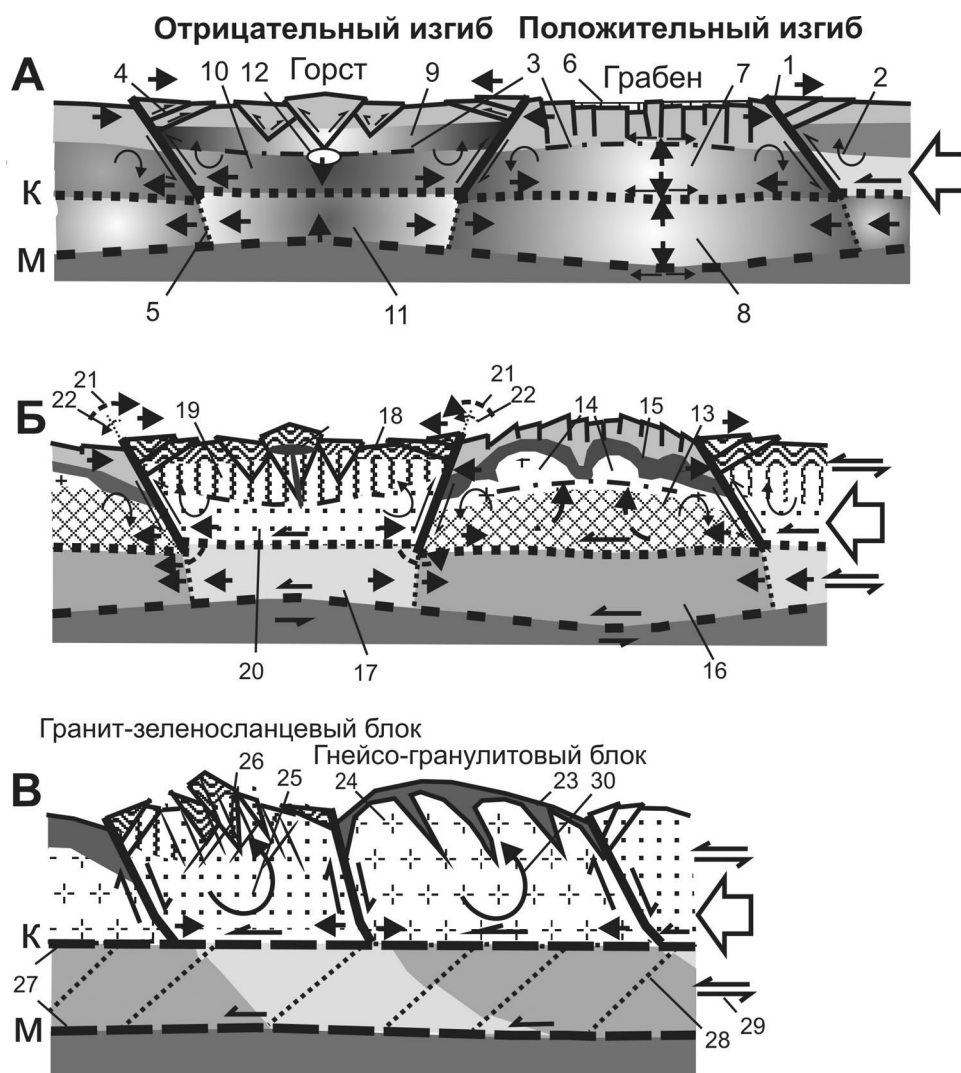
Сущность тектонических процессов заключается в передаче механической энергии на расстояние. Сущность же продольного изгиба коры заключается в **локализации и фокусировке** этой энергии, **аккумуляции и трансформации** ее в другие виды энергии (тепловую, химическую и др.). Без преувеличения можно сказать, что продольный изгиб коры является самым энергоёмким из всех процессов тектонического ее преобразования.

Общекоровая складчатость принципиально отличается от всех известных типов складчатости и, прежде всего тем, что **не образует синусоидальных изгибов** (рис.). Вместо них наблюдается чередование блоков утоненной и утолщенной коры. Закономерен вопрос: относится ли она, в таком случае, к складчатости вообще? Ответ здесь может быть только положительный, поскольку в основе механизма деформации лежат изгибающие моменты. Именно они обеспечивают локализацию и фокусировку механической энергии сжатия. И именно для их функционирования необходима слоистая модель из «компетентных» и «некомпетентных» слоев. Надо также принимать во внимание масштабы модели, силы гравитации и геологические масштабы времени. Суть релаксации напряжений, в т.ч. и изгиба, заключается в переводе упругих деформаций в остаточные. Отсюда главное, **релаксация напряжений сжатия происходит всеми возможными способами**, которые обладают объемными эффектами. К ним относятся, например, механическое перемещение вещества, закрытие порово-трещинного пространства, метаморфические реакции, уплотнение вещества, реакции дегидратации, перекристаллизация, растворение под давлением и т.д. Таким образом, изгибающие моменты создают резко метастабильную систему и условия для перераспределения вещества; можно сказать – полной перестройки структурированной среды.

Положительный изгиб. Выше нейтральной поверхности (НП) возникают условия растяжения, и может формироваться осевой грабен (рис. а). Поглощение энергии при этом минимальное. Ниже НП реализуются условия сжатия. Напряжения прямо пропорциональны расстоянию до НП. Поровое пространство сокращается, а флюидное давление растет. Механическая энергия сжатия трансформируется в другие виды энергии. Имеет место высокобарический метаморфизм и реакции дегидратации, что ведет к появлению **восстановленных флюидов**. Возможно, что дополнительно флюиды поступают и из дестабилизированной верхней мантии. **На прогрессивном этапе положительного изгиба действует прямой градиент стрессовых напряжений.** Это значит, что в кровле любого бесконечно малого объема коры стрессовые напряжения будут меньше, чем в его подошве. Поэтому любое вещество способное к течению в этих условиях – отжимается вверх. По этой причине ниже НП происходит осушение пород земной коры. Восстановленные флюиды поднимаются на верхние горизонты коры, где смешиваются с метеорными водами. По этой же причине в зоне сжатия не может возникнуть магматический очаг: в результате разогрева горные породы образуют пластические и квази-пластические потоки раньше, чем достигается температура их плавления. Вместе с тектоническими потоками переносятся вверх тепловая и химическая энергия. В результате этого над НП возникает латеральная по РТ-условиям аномалия, что может быть причиной возникновения здесь высокоградного зонального метаморфизма, куполообразования и появления анатектических гранитов (рис. б).

Отрицательный изгиб. Зона сжатия расположена выше НП. Холодные трещиноватые породы в условиях низких литостатических давлений подвергаются хрупким деформациям: брекчированию и мегабрекчированию. Эта область благоприятна для циркуляции метеорных вод. С глубиной, с ростом литостатического давления и в зависимости от реального геологического разреза, зона брекчирования сменяется бескорневой складчатостью, затухающей около НП (напомним, что напряжения при изгибе прямо пропорциональны расстоянию до НП). Основные же напряжения сжатия при отрицательном изгибе снимаются осевыми тектоническими клиньями и околосдвиговыми клинодислокациями и/или антиклинальными вздутиями. Благодаря стрессовым напряжениям и разогреву пород над НП имеет место низко-среднетемпературный метаморфизм повышенных давлений, достигающий зеленосланцевой фации. Ниже НП реализуются условия растяжения, разуплотнения и разогрева пород. Происходит метаморфизм пород в условиях пониженных и умеренных давлений. Снижение всестороннего давления способствует увеличению объема флюидной фазы и возникновению магматических расплавов. **Но при отрицательном изгибе коры действует обратный (запирающий) градиент горизонтальных напряжений.** Это значит, что в верхней части любого элементарного объема горизонтальные сжимающие напряжения больше, чем в его нижней части. В этих условиях движение флюидов и расплавов вверх становится невозможным. Движению их вниз препятствует отсутствие свободного пространства. Магматические расплавы при этом могут перегреваться, насыщаться флюидами и рудными компонентами. Запертые флюиды, вероятно, могут быть причиной появления здесь волноводов на различных глубинах и аномальных пластовых давлений. Возможно, что деформациями земной коры дестабилизирована и верхняя мантия. В таком случае часть материала могла поступать и из мантии. Разгрузка флюидных резервуаров и магматических очагов происходит либо при временном снятии/ослаблении стрессовых напряжений, либо в результате перехода к регрессивному этапу процесса.

Данная модель могла функционировать, вероятно, только в неогее, поскольку в более ранние периоды температура на поверхности Земли была, по-видимому, слишком высокой и, соответственно, «жесткость» коры была низкой. Судя по структурам и текстурам архейских пород, в это время в земной коре преобладали пластические и квазипластические деформации. Вероятно, только с появлением «холодной» верхней коры напряжения сжатия могли передаваться на некоторые расстояния и появились реальные условия для образования реологической и тектонической расслоенности. Без передачи напряжений сжатия на расстояния и реологической расслоенности – эта модель общекоровой складчатости существовать не может.



Динамика и эволюция развития общекоровой складчатости

А – общекоровая складчатость на начальном этапе развития; Б – то же, на позднем этапе; В – трансформация общекоровой складчатости в чешуйчато-надвиговые структуры (завершенная складчатость). Цифры с указателями: 1 – надвиг; 2 – изгибающие моменты; 3 – нейтральная поверхность; 4 – трещины скалывания (клинодислокации), околосдвиговые валы; 5 – зона пластического сдвига; 6 – синскладчатые осадочные образования; 7 – зона сжатия в верхней коре; 8 – то же, в нижней коре; 9 – зона сжатия; 10 – зона растяжения в 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 – направление разворота плоскости надвига при изгибе; 22 – направление разворота плоскости надвига в результате простого горизонтального сдвига; 23 – высокометаморфизованные породы; 24 – гранулиты; 25 – зеленокаменные породы, амфиболиты; 26 – дайковый комплекс; 27 – основные тектонические срывы; 28 – пластический сдвиг; 29 – простой сдвиг в горизонтальной плоскости; 30 – направление вращения и течения вещества. Пояснения в тексте

Толщина упругой коры является важным фактором для конечного результата реализации нашей модели. Она определяет не только длину волны, но и количество передаваемой тектоническим процессом энергии, а также энергоёмкость системы, которая напрямую зависит от структурно-вещественных преобразований коры. Например, результаты продольного изгиба плиты толщиной 1 км будут разительно отличаться от результатов подобного изгиба плиты толщиной 20 км. Для первого варианта, для изгибов столь маломощной коры возникновение условий высокобарического метаморфизма или магматических очагов представляется нереальным. Для изгибов же толстой коры они становятся весьма реальными.

Режимы горизонтального сжатия коры могут сменяться режимами растяжения различной продолжительности. Снятие напряжений горизонтального сжатия немедленно переводит систему в регрессивную стадию, и она начинает функционировать за счет запасенной энергии. Однако изгибная неустойчивость коры сохраняется, и когда вновь установится режим сжатия – регрессивная стадия процесса сменится прогрессивной стадией. Такая ситуация

может повторяться неоднократно. Интенсивность сжатия, его продолжительность, количество и продолжительность режимов растяжения, сохранение направления вектора тектонических сил и другие факторы слагают историю нагружения системы, определяют ее эволюцию и конечный результат. Поэтому все складчатые системы на Земле имеют индивидуальные черты, несмотря на схожесть образования.

Всякий процесс имеет свой ресурс. В общекоровой складчатости он исчерпывается, когда плоскости граничных надвигов (взбросов, флексур) окажутся параллельными, поскольку в процессе изгиба они вращаются и стремятся к вертикальному положению. Но в результате изгиба кора испытывает горизонтальное укорочение и пропорциональное вертикальное утолщение. Поскольку зоны граничных надвигов первоначально закладываются под углом около 45^0 к горизонту, то максимальное утолщение коры при изгибе не превысит 1,5 раза. На столько же кора и укоротится. Термин «надвиг» в модели общекоровой складчатости использован для обозначения тектонических границ между блоками положительного и отрицательного изгибов. На самом деле – он не отвечает классическому определению надвига. В реальности – это зона простого сдвига (в физическом понимании), появление которой обусловлено невозможностью образования арки при продольном изгибе коры. Смещения крыльев по данной зоне минимальные, только обеспечивающие изгиб.

В процессе деформаций реологические свойства упругой коры изменяются. Это вызвано, прежде всего, разогревом ее нижней части. Горизонтальные перемещения деформируемой упругой коры вызывает деформации простого сдвига (физического) в горизонтальной плоскости. В результате этого к вращению плоскостей граничных надвигов, вызванных изгибающими моментами, добавляется вращение, вызванное горизонтальным сдвигом (рис. Б). Количество движений суммируется. Там, где направления вращений совпадают, разворот надвигов ускоряется, а там где они имеют противоположные направления – скорость такого разворота уменьшается. По этой причине при завершении общекоровой складчатости границы блоков оказываются наклоненными в одну сторону, создавая иллюзию шарьяжно- или чешуйчато-надвигового строения коры (рис. В).

ЛИТЕРАТУРА

1. Талицкий В.Г. Структурные уровни деформаций в земной коре // Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика: Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1991. С. 297-301.
2. Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику: Учеб. пособие. М.: КДУ, 2005. 496 с.
3. Argand E. La tectonique de l'Asie. C.R. 13 Congr. Geol. Intern., Liege, 1922, 1924, p. 169-371.

ОПЫТ АНАЛИЗА УРАЛЬСКИХ СТРУКТУР С ПОЗИЦИЙ ОБЩЕКОВОЙ СКЛАДЧАТОСТИ

Кисин А. Ю.

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

Мы не знаем природу тектонических сил, вызывающих масштабную деформацию коры. Следовательно, мы не знаем, как они приложены к коре. Анализ глубинного строения Южного Урала по профилю УРСЕЙС-95 приводит к выводу, что тектонические силы приложены к верхней коре (либо передаются ей на расстояния). По крайней мере, в ней зафиксированы результаты работы этих сил. Нижняя кора относительно ее выглядит пассивной. Пассивной выглядит и верхняя мантия. Под Восточно-Уральской мегазоной граница Мохо весьма отчетливая, а нижняя кора изобилует сейсмическими неоднородностями, имеющим преимущественно западное падение. Этой части Урала в рельефе соответствует низкое плато. Под Магнитогорским прогибом граница Мохо погружается вниз и теряется, а западнее вновь появляется и несколько приподнимается. В этом интервале, западнее Магнитогорского прогиба, до Предуральского прогиба рельеф гористый. Предложено достаточно много интерпретаций наблюдаемого на данном профиле структурного рисунка земной коры Урала. Каким образом напряжения сжатия возникли в верхней коре, пока неясно. Но волна деформаций распространяется в ней с востока на запад (для Урала). То есть, максимальные укорочения/утолщения коры достигается на востоке.

К восточной мегазоне приурочен так называемый Главный гранитный пояс Урала. В работах Г.А. Кейльмана [1] показано, что данный пояс представлен преимущественно гнейсово-мigmatитовыми комплексами. Некоторые исследователи называют их зональными метаморфическими комплексами. Есть высказывания об их реликтовой, террейновой природе. Однако с этих позиций трудно объяснить их линейность, строгую подчиненность уральским простирациям, металлогеническую специализацию, выдержанность размеров и ряд других особенностей. Автором [2, 3], для Кочкарского метаморфического комплекса (Ю. Урал), было показано, что формирование его началось в позднем девоне (около 370 млн. лет) с формирования осевого грабена, который в условиях морского мелководья заполнялся трерригенно-осадочным комплексом, включая известняки. В поствизейское время здесь уже формировались купольные структуры, сложенные гранито-гнейсами, которые оказались на одном горизонте с визейскими, фаунистически охарактеризованными известняками. Данные купольные структуры явились источниками тепловых аномалий и