

БЛОКОВАЯ СКЛАДЧАТОСТЬ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

© 2016 г. А. Ю. Кисин, В. А. Коротеев

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15
Уральский государственный горный университет
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
E-mail: kissin@igg.uran.ru*

Поступила в редакцию 15.12.2015 г.

Принята к печати 21.03.2016 г.

Дано определение и краткое описание модели блоковой складчатости, по которой, возможно, деформируется реологически и тектонически расслоенная земная кора на участках одноосного горизонтального сжатия. Перечисляются основные отличия блоковой складчатости, главным из которых является деление коры надвигами встречного падения на блоки положительного и отрицательного изгибов, с сохранением ее квазиплоского состояния. В блоке отрицательного изгиба утолщение происходит за счет верхней части коры, а в блоке положительного изгиба, напротив, за счет нижней ее части. В процессе деформаций кора сохраняет способность передачи напряжений на расстояние. Экспериментальные исследования блоковой складчатости на песчаных и глинисто-песчаных моделях позволили выявить ряд особенностей объемной деформации блоков. Выяснилось, что в блоках обоих типов длинные оси эллипсов на боковой поверхности модели образуют веер, раскрытый кверху. Объясняется это выжиманием материала из ядер складок вверх, что создает сложное сочетание деформаций простого и чистого сдвигов, реализующихся в градиентном поле напряжений. Хрупкие деформации в зоне сжатия блока отрицательного изгиба подготавливают пустотное пространство, сопряженное с наиболее крупными разломами. Впоследствии эти разломы способны играть роль рудоподводящих, а пустотное пространство благоприятно для рудоотложения.

Ключевые слова: *геотектоника, эксперимент, земная кора, рудные месторождения.*

ВВЕДЕНИЕ

Существование в земной коре участков ориентированного горизонтального сжатия считается неоспоримым фактом, что подтверждается геологическими данными и инструментальными измерениями. Однако в отношении возможности образования складок коры при одноосном горизонтальном сжатии высказываются различные точки зрения, вплоть до диаметрально противоположных [1, 15–18, 20, 24, 25]. По результатам экспериментальных данных и физико-механического моделирования, главными проблемами возникновения складок коры называют величину критических сжимающих напряжений и передачу их на расстояния [3, 18, 20]. По этой причине возможность складчатых деформаций в масштабах земной коры в современной научной литературе почти не обсуждается, за некоторым исключением [1, 17, 23, 25].

Этих проблем лишена модель блоковой складчатости [8, 10]. Для возникновения складок продольного изгиба большое значение имеет нали-

чие “компетентных” и “некомпетентных” слоев, что установлено экспериментально [28], а также возможность межслоевого проскальзывания. Согласно концепции реологической и тектонической расслоенности литосферы [5, 12–14, 19, 20, 29], оба эти условия в коре полностью соблюдаются. Однако, несмотря на развитие геофизических методов глубинного зондирования, убедительных примеров складок продольного изгиба земной коры в научной литературе не приводится.

В масштабах геологического времени земная кора близка по физическим свойствам к *ньютоновской жидкости* и способна неограниченно деформироваться. Течение горных пород в твердом состоянии получило название “реидная деформация” [27]. Сюда включаются понятия “пластические деформации”, “хрупкие деформации”, меланжирование, дезинтеграция, катаклаз, динамическая рекристаллизация, течение гранулированных сред. М.Г. Леонов [11] считает, что “реидная тектоника” проявляется в различных масштабах, на любых уровнях, в коре любого типа, включая океанические и платформенные области.

СУТЬ МОДЕЛИ БЛОКОВОЙ СКЛАДЧАТОСТИ

Для возникновения блоковой складчатости при одноосном горизонтальном сжатии значение имеют следующие факторы: разделение коры на “компетентный” (верхняя упругая кора) и “некомпетентный” (атмосфера-гидросфера и нижняя кора) слои, способность межслоевого горизонтального проскальзывания, “реидные деформации”, масштабы геологического времени, силы гравитации. Но решающим является *невозможность возникновения пустоты* в подошве деформируемой коры. Природа не терпит пустоты и, следовательно, это условие всегда выполняется. Благодаря геологической предистории и своему положению (внешняя твердая оболочка Земли), кора характеризуется самой высокой анизотропией свойств на любом масштабном уровне: структурированная среда, по [4]. При возникновении ориентированных горизонтальных напряжений сжатия в земной коре всегда найдутся неоднородности (зоны трещиноватости, границы геологических тел и т.п.), которые приведут к образованию надвига. Благодаря невозможности возникновения пустоты в подошве коры, в лежащем и висячем боках надвига возникнут изгибающие моменты, и кора потеряет изгиб-

ную устойчивость (рис. 1а). В лежащем боку надвига закладывается положительный изгиб, а в висячем – отрицательный. Но, по той же причине, продольный изгиб не может развиваться без образования новых надвигов на границах смены знаков изгиба, то есть на границах полуволн. Это следует из рис. 1б: рост амплитуды волны продольного изгиба порождает рост пары противоположно направленных реактивных сил. Возникает тектонопара “надвиг-продольный изгиб”: надвиг порождает изгиб, а изгиб порождает надвиг [6], которая осуществляет всю работу. Система надвигов встречного падения делит кору на блоки (рис. 1в), в которых деформации осуществляются изгибающими моментами. Поэтому данный тип складчатости предлагается называть **блоковой**. Релаксация напряжений при блоковой складчатости частично решается “реидной тектоникой”, а частично отрицательными объемными эффектами, которые достигаются закрытием трещинно-порового пространства, фазовыми переходами, метаморфизмом, дегидратацией другими процессами.

Принципиальное отличие блоковой складчатости от привычной изоклиальной складчатости, имеющей подобие синусоиды, показано на рис. 2. На рис. 2а изображен продольный изгиб упругой земной коры (2), в случае реализации которого не-

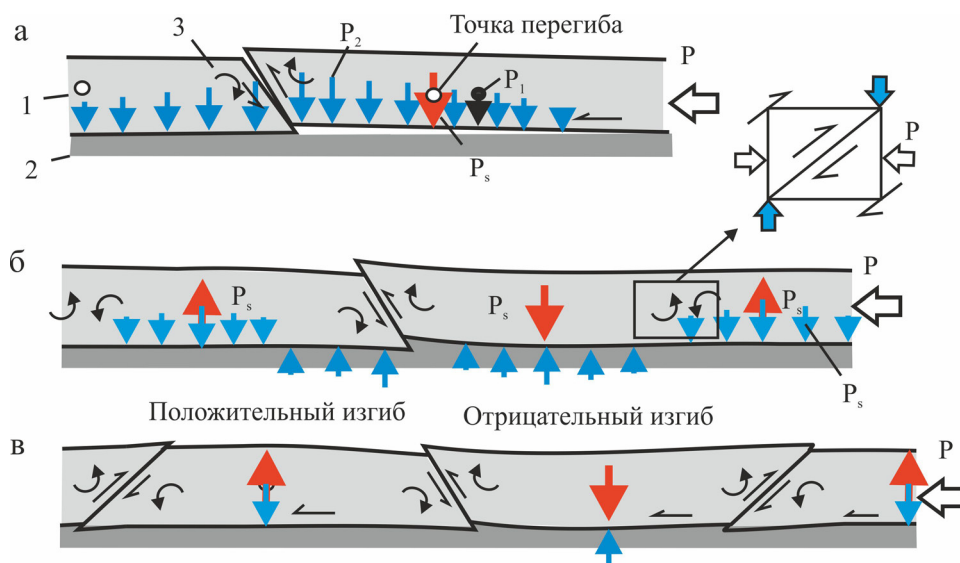


Рис. 1. Потеря изгибной устойчивости коры при образовании надвига (тектонопара “надвиг–продольный изгиб”).

Цифры: 1 – упругая кора, 2 – пластичная кора, 3 – изгибающие моменты. Буквы: P – активная тектоническая сила; P_1 – реактивная сила, связанная с весом плиты; P_2 – реактивная сила, связанная с невозможностью возникновения пустого пространства (белый треугольник на границе верхней и нижней коры); P_s – суммированные реактивные силы. Пояснения в тексте.

Fig. 1. Loss of flexural stability Earth's crust during overlap fault forming (tectonic couple: overlap fault–longitudinal bending).

Numbers: 1 – elastic crust, 2 – plastic crust, 3 – bending moments. Letters: P – active tectonic force; P_1 – reaction force associated with weight of plate; P_2 – reaction force about inability of empty space (white triangle on the border top and bottom crust); P_s – summarized reactive forces. Explanation text.

медленно возникают вертикальные реактивные силы, стремящиеся сгладить образовавшийся рельеф. Релаксации напряжений нет. Укорочения-утолщения коры нет. На рис. 2б приведена принципиальная схема блоковой складчатости тектонически и реологически расслоенной коры. Значительных перепадов рельефа здесь не возникает, блоки сохраняют торцовое сочленение, кора остается квазиплоской (см. рис. 2б), что позволяет ей передавать напряжения сжатия на расстояние. На рис. 2в показана принципиальная схема неравномерных объемных деформаций, имеющих место при блоковой складчатости: в блоке положительного изгиба утолщается нижняя часть коры, а в блоке отрицательного изгиба – ее верхняя часть (различная раскраска слоев использована только для их маркировки). При блоковой складчатости земная кора способна деформироваться неограниченно. Энергоемкость такой системы максимальная, а структурно-вещественные преобразования – предельно глубокие.

Математическое моделирование блоковой складчатости сопряжено с большими трудностями ввиду множества неизвестных, что лишает ее доказательной базы. В связи с этим, уместно напомнить слова известного отечественного тектониста и экспериментатора В.В. Белоусова: “Попытки поставить задачу численного моделирования... сложных структур (антиклинорий, тектонических зон) наталкиваются на невозможность дать формализованное описание механизмов, участвующих в их образовании.... Поэтому решения для крупных структур в целом носят качественный характер, без численной характеристики действовавших процессов” [26]. Экспериментальная проверка модели также представляет большие сложности, обусловленные, главным образом, масштабами явления, помноженными на масштабы геологического времени. Нам могут возразить, что для экспериментальных исследований структурообразования при тектонических процессах давно и успешно используется теория подобия, например, [24]. Это справедливо, однако относительно подобия в экспериментах В.В. Белоусов [16, с. 19] пишет: “Достижение в общем виде сколько-нибудь удовлетворительного подобия в тектоническом моделировании не только невозможно сейчас, но и не видно путей, которые позволили бы надеяться осуществить такое подобие когда-либо в будущем” И далее: “в огромном большинстве случаев при тектоническом моделировании подобие просто не нужно, если все, что мы требуем от модели, – это отражение некоторых исходных закономерностей деформаций и разрушения твердых тел”(с. 2, курсив В.В. Белоусова) Вот этого последнего тезиса мы и придерживались, моделируя блоковую складчатость коры. Целью проведенных нами экспериментов была попытка воспроизвести лишь механистическую часть процесса, насколько это будет возможно, и показать, что

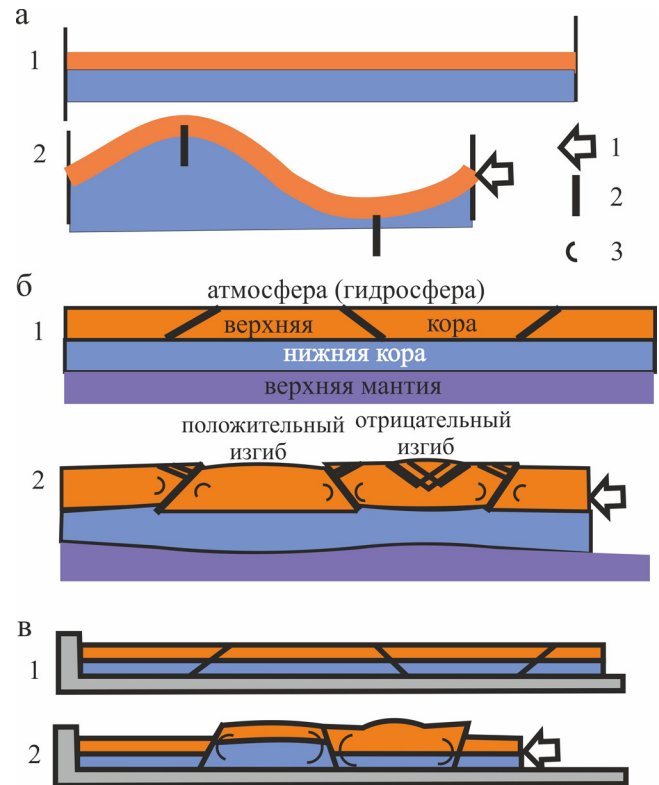


Рис. 2. Принципиальное отличие блоковой складчатости и обычной складчатости продольного изгиба: а – земная кора в состоянии покоя (1) и смятая в обычные складки продольного изгиба (2), б – реологически расслоенная кора (1) и блоковая складчатость (2), в – слоистая модель (1) и распределение напряжений сжатия (утолщения) в блоковой складчатости (2).

1 – горизонтальная тектоническая сила, 2 – реактивные силы, 3 – изгибающие моменты. Пояснения в тексте.

Fig. 2. The fundamental difference between the block faulting and the usual faulting of longitudinal bending: а – crust at the rest (1) and crumpled in the usual faulting of longitudinal bending; б – rheologically stratified crust (1) and block faulting (2); в – layered model (1) and compression stress distribution (thickening) of the block faulting (2).

1 – horizontal tectonic force, 2 – rocket forces; 3 – bending moments. Explanation in text.

блоковая складчатость существует, и деформации в блоках контролируются изгибающими моментами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Попытки экспериментально воспроизвести блоковую складчатость авторами предпринимались неоднократно. Для этого использовались различные материалы, менялись условия деформирования, применялись узкие и широкие стеклянные кюветы. Все эти эксперименты оказались неудачны-

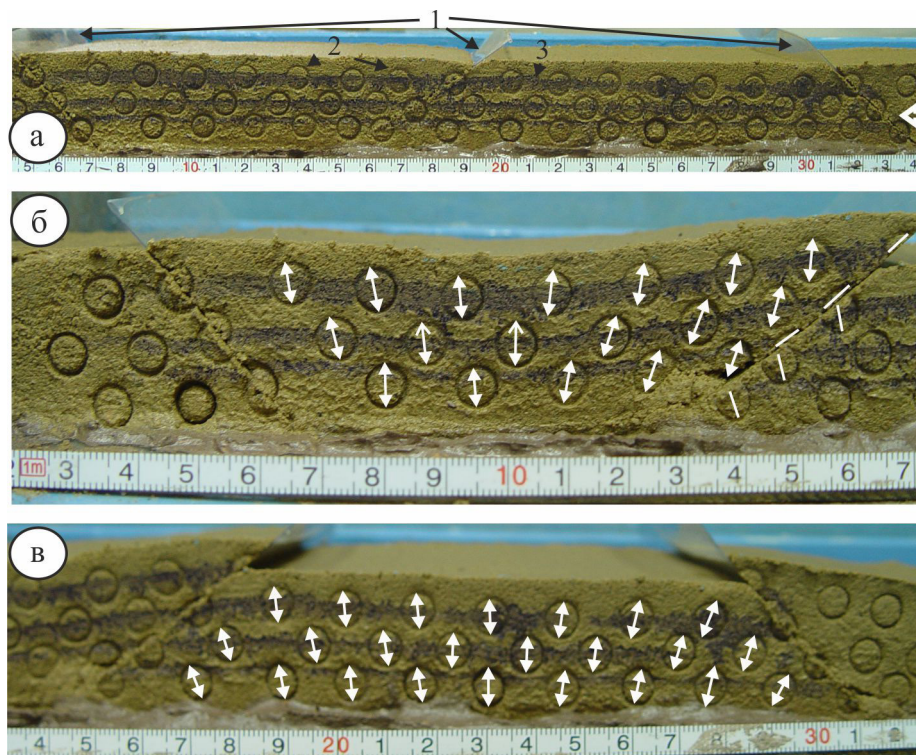


Рис. 3. Эксперимент по моделированию блоковой складчатости: исходное положение (а), деформации блока отрицательного (б) и положительного (в) изгибов.

Цифры с указателями: 1 – пластиковые пластинки; 2 – круги, нанесенные вдавливанием торца трубки; 3 – полосчатость, созданная окрашиванием поверхности. Пояснения в тексте.

Fig. 3. The experiment for modeling block faulting: the original position (а), deformation of the blocks of negative (б) and positive (в) bends.

Figures with pointers: 1 – plastic plates; 2 – circles made by pressing the butt tube; 3 – stripes made by dyeing. Explanation in text.

ми, поскольку коэффициент трения модели о боковые стенки кюветы не позволял достичь желаемых результатов. По этой причине пришлось отказаться от использования какого-либо бокса. Эксперименты выполнялись на горизонтально лежащем листе стекла, с одной стороны которого устанавливался упор. В качестве эквивалентного материала для модели использовались глинистые пески: кварцевый песок фракции –1 мм (5 частей), и пластичная глина (1 часть). Состав глины: каолинит 60%, монтмориллонит и гидрослюда 40%. Пропорции подбирались так, чтобы в увлажненном состоянии материал при сжатии пластически деформировался, а при изгибе ломался. Глинистые пески в сильно увлажненном состоянии тщательно перемешивались, затем заливались в специальную узкую длинную форму и выстаивались в течение суток или более. За это время влажность песков понижалась до 10–12%, и они легко сохраняли форму прямоугольного бруска. Размеры модели 450 × 50 × 35 мм. В качестве подстилающего (контактного) слоя использовалась глина из кор выветривания (состав: каолинит 45–50%, мелкая слюда 45–50% и крупночешуйча-

тый графит 3–5%; влажность 40%). Стекло покрывалось ровным слоем сильно разжиженной глины толщиной 1–2 мм, на которую широкой стороной укладывался заготовленный брусок из глинистых песков и прижимался к стеклу, чтобы выдавить глинистый раствор. Это обеспечивало легкое скольжение модели по стеклу и, главное, герметизировало контакт между ней и стеклом, создавая “эффект присоски”. К одному концу бруска из глинистых песков подводился пресс и толкал его вторым концом к упору. Если модель при этом не испытывала заметных деформаций, то считалось что она готова к эксперименту (способна передавать напряжения на расстояние).

На следующем этапе создавалась система “крутопадающих разломов”, разделяющих заготовку на моделируемые блоки “отрицательного” и “положительного” изгибов, как показано на рис. 3а. Это было необходимо делать для того, чтобы создать ослабленные зоны. Считается, что в земной коре существует множество различно ориентированных трещин; в условиях горизонтального одноосного сжатия активизируются трещины совпадающие с

главными касательными напряжениями. При этом предполагалось, что длина блока по срединной поверхности в 3–4 раза превышает его толщину. Такое соотношение отвечает реальным структурам земной коры ранга “антиклинорий-синклинорий”. Для создания “разломов” использовались пластиковые пластинки (в других случаях калька), которые задавливались в глинисто-песчаную модель по направляющей, задающей угол около 45° . В некоторых экспериментах делались только наклонные разрезы модели на блоки. Реальный угол разреза замерялся по фотографии. Пластиковые пластинки значительно понижали коэффициент трения, что позволяло возникать сдвигам (надвигам) даже при слабых горизонтальных напряжениях. Затем на глинисто-песчаную модель наносились маркеры (см. рис. 3а). Полосчатость создавалась нанесением темной акварельной краски на боковую поверхность с помощью деревянной линейки и последующим перенесением ее на боковую поверхность модели контактным способом. Кольца наносились вдавливанием в боковую поверхность модели торца тонкой трубки. Готовая к эксперименту модель фотографировалась, делались замеры длины, ширины и толщины, отбирались образцы на определение влажности. Скорость движения индентора не превышала 1 мм в минуту. Измерения величины нагрузки не производились, поскольку они для решения поставленных задач большого значения не имели. После сокращения модели на каждые 5 мм (около 1%) – процесс останавливался для фотографирования и изучения характера образовавшихся деформаций. Эксперименты прекращались при разгерметизации контакта между стеклом и моделью или в случае ее внутреннего расслоения (возникновение пологих трещин отрыва в блоке отрицательного изгиба). Обычно к этому моменту сокращение длины модели составляло 10–12%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все эксперименты этой серии показали схожие результаты. Смещения надвиговой кинематики в плоскостях всех “разломов” возникали немедленно после приложения к модели сжимающей силы. Следовательно, есть межслоевое проскальзывание, **модель передает напряжения на расстояние и деформации происходят одновременно на нескольких участках**. Рассмотрим подробнее эксперимент, в котором смежные блоки были разделены пластиковыми пластинками (см. рис. 3). Данный эксперимент был прекращен после возникновения в блоке отрицательного изгиба пологой трещины отрыва и укорочения модели на 12%. Максимальные смещения по надвигам наблюдаются вблизи индентора, а минимальные вблизи упора. Части кругов, рассеченных плоскостями сместителей, испытывали разную деформацию. Дуги кругов в висячем боку надвигов

подверглись растяжению, ориентированному близко к плоскости надвига, и сжатию в перпендикулярном к ней направлении. Деформации растяжения возрастали от кровли модели к ее подошве. Максимальная амплитуда смещений характерна для верхней части висячего бока и понижается к подошве модели. В лежащем боку надвигов деформации носят более сложный характер. Движение масс вниз вдоль плоскости сместителя оказалось невозможным из-за жесткого основания, что вызвало сжатие дуг кругов в плоскости надвига. Степень их деформации возрастает к подошве модели.

В результате горизонтального сжатия и деформаций, блок отрицательного изгиба прогнулся книзу (рис. 3б), а блок положительного изгиба – вверх (рис. 3в), что подтвердило ожидания. Круги на боковой поверхности модели трансформировались в эллипсы. Неожиданным оказалось то, что в обоих блоках длинные оси эллипсов образуют веер раскрытый вверх. Из экспериментов [18] и учебников по структурной геологии известно, что при отрицательном изгибе длинные оси эллипсоидов деформации образуют веер раскрытый книзу, а при положительном изгибе вверх. Из проведенных нами экспериментов не складывалось отчетливой картины о механизмах деформации, приведших к такой ориентировке длинных осей эллипсов.

Для выяснения этого вопроса была проведена еще серия экспериментов с моделированием зоны сжатия в блоке отрицательного изгиба (то есть, части блока ограниченного снизу нейтральной поверхностью). Для эксперимента использовался щелевидный стеклянный бокс с одной подвижной стенкой, расклиненной поролоновой прокладкой. Подвижная стенка позволяла поддерживать борта песчаной модели и не заклинивать ее в процессе деформирования. В бокс на опоры устанавливалась пластиковая полоса шириной 13 мм с жестко закрепленными по краям деревянными прямоугольными равносторонними треугольниками, гипотенузы которых имитируют плоскости надвигов встречного падения. Пластиковая полоса в эксперименте играла роль нейтральной поверхности, длина которой при изгибе не меняется. Затем создавалась песчаная модель послойным насыпанием светлых (кварцевых) и темных (ставролитовых) песков фракции –1 мм. Контрастная по цвету слоистость в песчаной модели создавалась только для наглядности. Длина модели по верху составила 41 см, высота 5.5 см, толщина 1.3 см. Такая разница в длине, высоте и толщине приближала модель к двумерной. Затем пески смачивались раствором поваренной соли и высушивались, что вело к их уплотнению и слабой цементации. Деформация модели производилась либо подъемом ее за концы пластиковой полоски, либо провисанием модели на крайних опорах, после удаления центральной. Подвижная боковая стенка позволяла понизить влияние бокового распора. Результа-

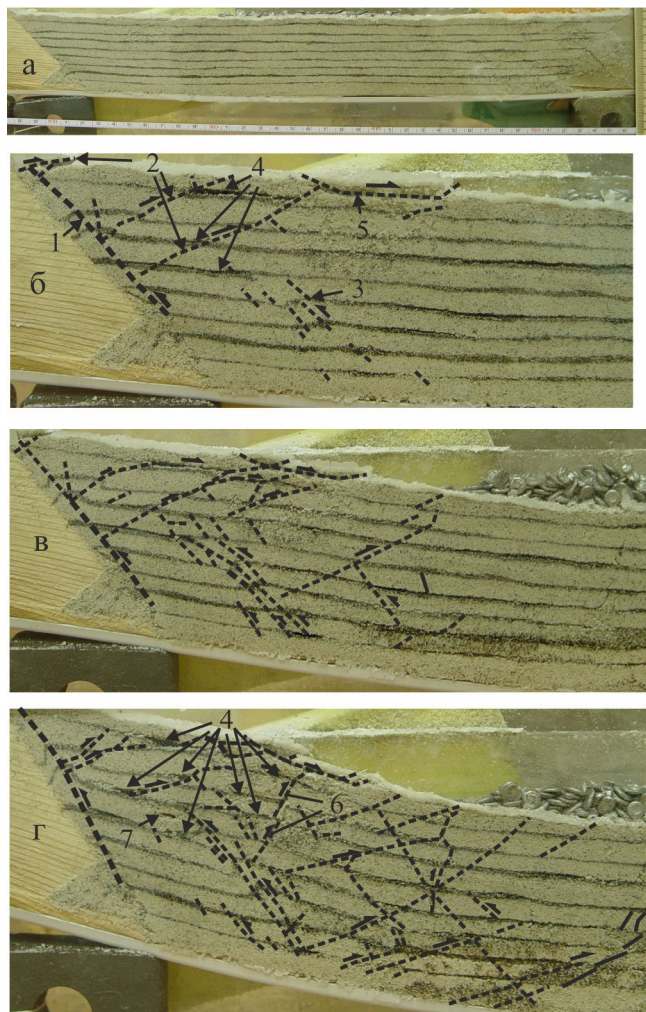


Рис. 4. Эксперимент по моделированию зоны сжатия блока отрицательного изгиба: исходное положение (а), деформации при кривизне изгиба 10° (б), 18° (в) и 30° (г).

Пояснения в тексте.

Fig. 4. The experiment for modeling of compression into block of negative bending: starting position (а), deformation at curvature bending 10° (б), 18° (в) and 30° (г).

Explanation in text.

ты всех экспериментов этой серии отличались деталями, но в целом были однотипными. Результаты одного эксперимента показаны на рис. 4.

Вскоре после начала эксперимента, при угле изгиба 10°, вдоль заданной жестким треугольником поверхности надвига возник сдвиг, по кинематике отвечающий надвигу (см. рис. 4б, цифра 1). Он отчетливо проявлен в верхней части модели и постепенно затухает книзу. Висячем боку возникшего надвига (далее главного надвига) отчетливо проявилось три дуплекса скалывания, также с надвиговой кинематикой (цифра 2). Поверхности сместите-

лей почти параллельны. В углу, образованном плоскостями главного надвига и второго дуплекса скалывания возникло антиклинальное вздутие, расщеченное слепой субвертикальной трещиной растяжения, поднимающейся снизу вверх. Антиклинальное вздутие образовано двумя флексурами, возникшими в зоне надвига и дуплекса. В самом верхнем слое эта структура не проявилась, что обусловлено, вероятно, относительной прочностью слоя и слабой вертикальной нагрузкой. Ниже дуплексов образовалась система субпараллельных слепых трещин, ориентированных почти параллельно плоскости главного надвига (цифра 3). По отдельным трещинам наблюдаются смещения надвигового характера. В результате смещений по системам трещин обозначенных цифрами 2 и 3, возникли локальные отслоения с образованием пустотного пространства (цифра 4). Все отслоения приурочены к границам слоев. Самый верхний слой модели подвергся разламыванию на блоки с нагромождением их друг на друга, которое при дальнейшем изгибании модели только усиливалось. В некоторых экспериментах зона брекчирования захватывала и более глубокие слои модели. Отчетливо проявлена кинематика горизонтального смещения блоков верхнего слоя к осевой части изгиба.

На рис. 4в показаны деформации модели при изгибе 18°. Ранее возникшие дуплексы трещин скалывания остаются активными и показывают тенденцию к выполаживанию по мере приближения к поверхности. На более глубоких горизонтах появились новые дуплексы той же ориентировки и кинематики. Слепые трещины (см. рис. 2, цифра 3) удлинились, и произошла локализация сдвига. Часть мелких трещин этого типа потеряла активность. Ближе к осевой части модели возникли дополнительные трещины скалывания данной ориентировки и кинематики. Зона брекчирования верхней части модели продолжает разрастаться. Увеличиваются амплитуды антиклинального вздутия на участке сочленения главного надвига и 2-го дуплекса.

На рис. 4г показаны деформации модели при изгибе 30°. Система трещин скалывания, обозначенных цифрами 2 и 3, продолжает развиваться и усложняться, охватывая все большие объемы модели. Появилась дополнительная система трещин с кинематикой взброса (цифра 6). С ней связано образование нового антиклинального вздутия. Значительно возросло количество полостей отслоения, особенно к верхней части модели. Появились одиночные внутрислоевые трещины вертикального растяжения (цифра 7), что еще больше увеличило пустотное пространство. Нижняя часть крупного дуплекса (третий сверху на рис. 4б) отмерла, а активизировалась межслоевая граница.

Осевая часть изгиба на рисунках не показана, поскольку здесь имелись только квазипластические деформации, вызывающие лишь утолщение сло-

ев. Не показана и правая часть модели, поскольку стиль ее деформаций такой же, как и в левой части.

ОБСУЖДЕНИЕ

Данный эксперимент не совсем соответствует блоковой складчатости, поскольку здесь: 1) материальная нейтральная поверхность, зафиксирована в пластиковой полоске в основании блока и 2) дугообразный изгиб. В случае блоковой складчатости нейтральная поверхность виртуальная, динамичная, а столь значительного прогибания слоев не будет; но стиль деформаций будет подобный. Чтобы представить такую блоковую складчатость, надо мысленно зафиксировать положение левой части модели, показанной на рис. 4б–г, и приподнять ее правую часть вертикально до почти горизонтального положения. Для превращения изогнутой в дугу модели опять в “плоскую” достаточно только увеличить амплитуды смещений надвиго-взбросового типа по наклонным трещинам, с одновременным их вращением. Поскольку стрессовые напряжения нарастают к осевой части блока, то и максимальные амплитуды смещений должны быть здесь же, что выразится в создании осевого горстового поднятия. При внимательном рассмотрении деформированной модели мы видим, что трещины обозначенные цифрами 2 и 3 подобны и имеют близкие углы с поверхностью блока. Те и другие обусловлены одним полем касательных напряжений, меняется только доминанта движений вещества и условия возникновения разрывов. Большая скорость деформации и приповерхностные условия привели к быстрой локализации сдвиговых напряжений в виде дуплексов трещин скалывания (см. рис. 4б), а медленные сдвиговые деформации в более глубинных условиях создали вначале зону объемной трещиноватости (цифра 3) и только позднее протяженные трещины. Амплитуды смещений по всем наклонным трещинам максимальные около верхней границы блока и падают до нуля вниз. Можно сделать заключение, что амплитуда смещений верхнего конца трещины прямо пропорциональна ее протяженности по падению.

Теперь вернемся к рис. 3б и рассмотрим причины ориентировки длинных осей эллипсов в блоке отрицательного изгиба, образующих веер раскрытый кверху. В свете результатов эксперимента (см. рис. 4), это объясняется следующим. Вертикальное положение длинной оси эллипса в центре блока обусловлено чистым сдвигом в условиях горизонтального сжатия (коаксиальное сжатие), вертикального растяжения и встречного вращения наклонных трещин. По обе стороны от осевой поверхности изгиба длинные оси эллипсов увеличивают углы падения, что объясняется возрастанием доминанты одного из векторов касательных напряжений (не коаксиальное сжатие). Из общей картины закономерностей роста углов наклона эллипсов

идов, по мере удаления от осевой поверхности изгиба, исключением являются крайние верхние эллипсы, показывающие противоположную тенденцию. Это объясняется ростом доминанты вектора другого касательного напряжения, связанном с влиянием вращения плоскости главного надвига.

Строго говоря, фигуры, образовавшиеся при деформации кругов в данном эксперименте, не являются эллипсами. Форма их ближе к яйцевидной, что устанавливается при их внимательном рассмотрении. Длинные оси этих фигур не отражают действительного положения эллипсоида деформаций простого сдвига. Объясняется это несколькими причинами. Во-первых, имеются одновременные деформации простого сдвига и по второму вектору главных касательных напряжений, маскирующие действительное смещение по направлению основного сдвига. Во-вторых, деформации проходят в условиях горизонтального сжатия, т.е. накладывается составляющая чистого сдвига. В-третьих, поля всех этих напряжений градиентные и разные части круга деформируются в различных условиях. В результате этого конечная фигура деформации круга имеет сложную форму, только отдаленно напоминающую эллипс. Области таких деформаций в современной научной литературе принято называть зонами транспрессии.

Рис. 5 показывает основные особенности деформации блока отрицательного изгиба. На рис. 5а приведена упрощенная качественная эпюра напряжений, вызванных изгибом. Поле касательных напряжений отражено на рис. 5б. Пунктирная линия со стрелкой показывает примерный вектор касательных напряжений, направление стрелки указывает направление роста величины этих напряжений. Доминирующее сдвиговое движение показано длинными полустрелками, а второе сдвиговое движение – короткими. На рис. 5в показаны направления основных трещин, возникающих при изгибе: толстые линии со стрелками обозначают наиболее протяженные трещины, тонкие линии показывают мелкую трещиноватость. Направление стрелки указывает направление роста трещины. Полустрелки показывают смещение активного борта трещины. Сюда же вынесены эллипсы мгновенной деформации. На рис. 5г приведены схемы эволюции эллипсов мгновенной деформации для различных участков блока отрицательного изгиба и действующие на них силы. Сочетанием полустрелок и прямых линий отражено градиентное поле и направление сдвигового течения. Градиентное поле горизонтального сжатия здесь не отражено, но оно максимальное вверху и минимальное внизу.

В блоке положительного изгиба длинные оси эллипсов (сохраним термин для простоты изложения) находятся в схожей ситуации. В осевой части деформации осуществляются по механизму чистого сдвига с тенденцией выжимания материала вверх. По обе

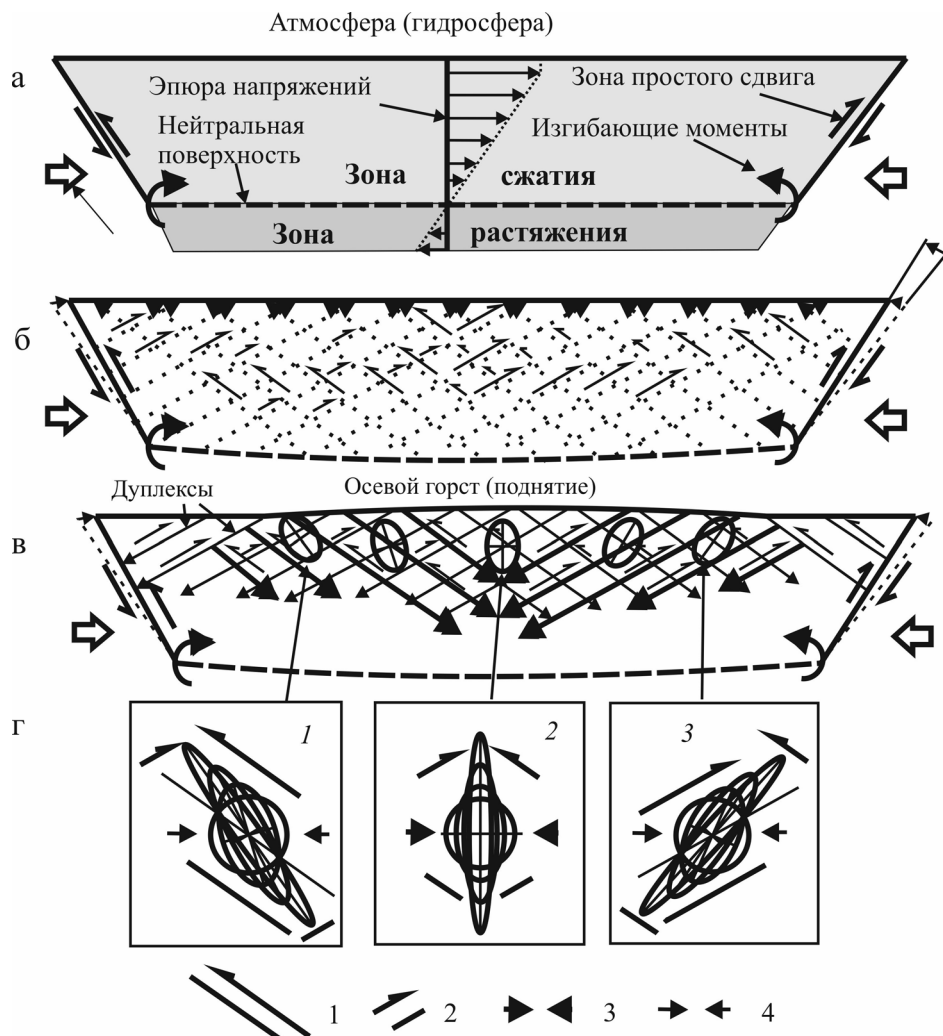


Рис. 5. Блок отрицательного изгиба: общий вид с качественной эпюрой напряжений (а); векторы касательных напряжений (б); структурный рисунок, образуемый разрывными нарушениями с указанием их кинематики (в); здесь же показаны эллипсы мгновенной деформации; ниже (г) показана эволюция эллипсов мгновенной деформации в сложном градиентном поле напряжений разных участков блока.

Условные обозначения (для г): 1 – доминирующий простой сдвиг в градиентном поле напряжений; 2 – то же, второстепенный; 3 – чистый сдвиг доминирующий; 4 – то же, второстепенный.

Fig. 5. Block of negative bending: General view from a qualitative plot of stress (a); vectors of tangent tensions (б); structural design formed by a rapture irregularities, with showing their kinematics (в); here showing ellipses of instantaneous deformation; the ellipse evolution of instant deformation in a complex gradient field strains of different sections of the block (г).

Legend (fig. г): 1 – dominating a simple shift in the gradient strain field; 2 – the same secondary; 3 – pure shear dominating; 4 – the same, secondary

стороны от осевой поверхности возрастает доминанта одного из векторов касательных напряжений. Длинные оси эллипсоидов деформации образуют веер раскрытый кверху. Вдоль плоскостей надвигов возникают сдвиговые деформации, вызванные движением материала вниз, чему препятствует жесткое основание. В результате этого появляются условия вертикального сжатия, нарастающие с глубиной.

В случае синусоидального изгиба нейтральная поверхность смещается в сторону зоны сжатия [2].

В эксперименте, показанном на рис. 3, ярко проявлена противоположная тенденция: нейтральная поверхность резко смещена в пользу увеличения зоны сжатия. Существование зоны растяжения в блоке положительного изгиба показала деформация кругов, нанесенных на верхнюю поверхность модели в некоторых экспериментах. Это следует и из факта вращения плоскостей надвигов. Смещение нейтральной поверхности в направлении зоны растяжения имеет большое значение, поскольку позволяет пере-

давать горизонтальные напряжения сжатия на расстоянии от внешнего источника. Вращение надвигов в направлении вертикальной плоскости способствует непрерывному увеличению передачи тектонической энергии дальше, не прекращая деформации в контролируемых ими блоках. Подобная картина невозможна при обычной складчатости.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данных экспериментах показано, что при блоковой складчатости деформации охватывают **весь объем** блоков. То есть, действуют объемные силы. Такой результат нельзя получить при блоковой тектонике, в чем заключается принципиальное отличие этих двух моделей. Деформации объемов в блоках положительного и отрицательного изгибов различные. Блоки отрицательного изгиба специализируются на рудных месторождениях и деформации верхних горизонтов в этих блоках подготавливают рудовмещающие структуры [9].

Как следует из теоретических построений и результатов экспериментов (см. рис. 4 и 5), в блоке отрицательного изгиба формируются крупные области объемной трещиноватости. Здесь можно выделить две системы трещин. Одна система трещин оперяет зону главного надвига (дуплексы скалывания с антиклинальными вздутиями). Зона надвига в реальных условиях имеет глубокое заложение и, вероятно, достигает границы Мохо. После снятия стрессовых напряжений она становится проницаемой для флюидов и может выполнять роль рудоподводящей структуры. Дуплексы скалывания, антиклинальные вздутия и верхняя часть самой надвиговой зоны хорошо подходят для роли рудолокализирующих структур.

Вторая система трещин имеет надвиг-взбросовую кинематику и встречное падение, формируя разномасштабные тектонические клинья. Данная система трещин охватывает всю область лежащую выше нейтральной поверхности. Благодаря этим клиньям, в осевой части блока образуется **горстовое поднятие**, а верхние горизонты подвержены брекчированию и мегабрекчированию. Возникают полостные пространства, количество и размеры которых возрастают к верхней границе блока. В реальных геологических условиях они будут заполнены метеорными или морскими водами. В экспериментах все значимые пустотные пространства возникали вблизи наиболее крупных разрывов, уходящих на значительную глубину. Следовательно, данные разрывные нарушения хорошо подходят под роль рудоподводящих разломов, по которым ювенильные воды беспрепятственно могут подняться на верхние горизонты коры. Амплитуды смещений пропорциональны вертикальной протяженности трещин, что может быть использовано для оценки их масштабов. Полостные пространства, связанные с отслоением,

смещением блоков, брекчированием и мегабрекчированием, являются благоприятным местом рудоотложения при смешении ювенильных вод с метеорными или морскими захороненными водами.

Как было показано ранее [9], при отрицательном изгибе коры действует обратный (запирающий) градиент стрессовых напряжений. Ювенильные воды на прогрессивном этапе процесса остаются “запертыми”, что ведет к их перегреву и обогащению рудным веществом, в зависимости от состава дренируемых ими пород. При этом подток флюидов возможен и из верхней мантии. На регрессивном этапе стрессовые напряжения снимаются, и перегретые рудоносные растворы поступают в верхние горизонты коры, в подготовленные полостные пространства. Часть глубинных флюидов могла поступать сюда и на прогрессивном этапе процесса, в периоды временного тектонического покоя. Примером подобного рудообразования может быть Сафьяновское месторождение на Среднем Урале [9], которое считается колчеданным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты экспериментов показали, что блоковая складчатость земной коры возможна. Для ее образования достаточно наличие ориентированных горизонтальных сжимающих напряжений, надвиговых структур соответствующего ранга, возможности горизонтального проскальзывания и невозможности возникновения пустотного пространства в подошве. Реологически и тектонически расслоенная кора удовлетворяет всем требованиям, необходимым для образования блоковой складчатости.

2. Эксперименты показали принципиальные отличия блоковой складчатости от широко известной и привычной складчатости синусоидального типа. В результате сложных деформаций в блоке отрицательного изгиба кора утолщается за счет верхней части, а в блоке положительного изгиба – за счет ее нижней части. Плиткообразная форма коры сохраняется. Такие масштабные структурные преобразования коры будут сопровождаться не менее масштабными вещественными ее преобразованиями.

3. Разрывная тектоника в блоке отрицательно-го изгиба подготавливает пустотные пространства, сопряженные с наиболее глубинными разломами. При последующих процессах, протекающих в де-стабилизированной коре, они могут играть роль рудоподводящих и рудовмещающих структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арган Э. (1935) Тектоника Азии. М.; Л.: ОНТИ, 192 с.
2. Бондаренко П.М., Луцицкий И.В. (1969) О полях напряжения в складках, возникающих вследствие продольного изгиба. *Докл. АН СССР*, **188**(4), 878-880.
3. Гзовский М.В. (1975) Основы тектонофизики. М.: Наука, 536 с.

4. Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. (2005) Введение в тектонофизику: М.: КДУ, 496 с.
5. Иванов С.Н. (1998) О реологических моделях земной коры; критическое рассмотрение. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 41 с.
6. Кисин А.Ю. (2005) К проблеме надвигов в земной коре. *Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Материалы XXXVIII Тект. совещ. Т. 1*, 285-288.
7. Кисин А.Ю. (2009) Структурная позиция и время образования прожилково-вкрапленных руд Сафьяновского Zn-Cu месторождения (Средний Урал). *Литосфера*, (5), 72-84.
8. Кисин А.Ю., Коротеев В.А. (2007) Общекоровая складчатость мобильных поясов. *Докл. АН*, **415**(5), 646-650.
9. Кисин А.Ю., Коротеев В.А. (2009) Градиенты стрессовых напряжений – как причина перемещения вещества при общекоровой складчатости. *Докл. АН*, **424**(1), 67-70.
10. Коротеев В.А., Кисин А.Ю., Сазонов В.Н. (1998) Модель формирования складчатых поясов на коллизионном этапе (на основе горизонтального сжатия с изгибом). *Докл. АН*, **358**(4), 508-510.
11. Леонов М.Г. (2008) Тектоника консолидированной земной коры. М.: Наука, 464 с.
12. Леонов Ю.Г. (1991) Платформенная тектоника в свете представлений о тектонической расслоенности земной коры. *Геотектоника*, (6), 3-20.
13. Леонов Ю.Г. (1994) Строение литосферы в отраженных волнах. *Геотектоника*, (4), 85-88.
14. Леонов Ю.Г. (1997) Тектоническая подвижность коры платформ на разных глубинных уровнях. *Геотектоника*, (4), 3-23.
15. Макаров В.И. (1977) Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М.: Наука, 171 с.
16. Методы моделирования в структурной геологии. (1988) (Под ред. В.В. Белоусова и А.В. Вихерта). М.: Недра, 222 с.
17. Никишин А.М. (2002) Тектонические обстановки. Внутриплитные и окраинноплитные процессы. М.: МГУ, 366 с.
18. Рамберг Х. (1985) Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Недра, 399 с.
19. Тектоническая расслоенность литосферы. (1980) М.: Наука, 215 с.
20. Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов. (1982) М.: Наука, 115 с.
21. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования. (1990) М.: Наука, 293 с.
22. Тёркот Д., Шуберт Дж. (1985) Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 1. М.: Мир, 374 с. Ч. 2. М.: Мир, 360 с.
23. Хаин В.Е., Яблонская Н.А. (1997) Структурный рисунок Альпийско-Гималайского и Центрально-Азиатского горных поясов как отражение верхнекорových упруго-пластических деформаций. *Докл. АН*, **353**(5), 655-658.
24. Шерман С.И. (1984) Физический эксперимент в тектонике и теория подобия. *Геология и геофизика*, (3), 8-18.
25. Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. (2003) Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 300 с.
26. Яковлев Ф.Л. (2001) Исследование механизма образования линейной складчатости как одно из направлений тектонофизики. *Бюл. МОИП. Отд. Геол.*, **76**(4), 7-15.
27. Carey S.W. (1971) The Reid Concept in Geotectonics. *Nature*, **230**, 42-45.
28. Ivanov S.N., Ivanov K.S. (1993) Hydrodynamic Zoning of the Earth's crust and its Significance // *J. Geodynamics*, **17**(4), 155-180.
29. Willis B. (1892) Mechanics of Appalachian Structure. *U.S. Geol. Survey. An. Rept.*, **13**(2), 213-281.

Block folding: experimental studies and practical significance

A. Yu. Kissin, V.A. Koroteev

*Institute of geology and geochemistry, Ural branch of RAS
620075, Yekaterinburg, street Lane, 7
E-mail: kissin@igg.uran.ru*

Definition and description of a block folding model of rheological and tectonically stratified Earth crust deformation on the sections of horizontal uniaxial compression have been done. The main differences of block folding are listed, the major of which is a dividing of a crust by overlap oncoming falls to the blocks of the positive and negative curves, while retaining its quasi-plate state. In a negative block bending thickening occurs through the top of the crust, and in a positive block bending, on a contrary, due to the lower part of a crust. In a process of deformation stress transfer retains an ability to bark at a distance. Experimental researches of block folding with a use of sandy and clay-sand models have identified a number of characteristics of volumetric deformation of blocks. It's turned out that both types of blocks in the long axis of ellipses on the lateral surface of the models form an opened up fan. This can be explained by material squeezing up out of folds' cores, which creates a complex combination of deformation of pure and simple shifts, used in a gradient field of voltages. The brittle deformations in a zone of compression of a negative block bending prepare a wide space conjugated with the large faults. Subsequently, the faults are capable of playing the role of fluid channels and a free space is favorable for ore location. We can give an example of the Safjanovskoe ore deposit at the Middle Urals that is considered to be massive sulphide ore.

Key words: *geotectonics, experiment, Earth crust, ore deposits.*

REFERENCES

1. Argan A. (1935) *Tektonika Azii*. [Tectonics of Asia] Moscow; Leningrad, ONTI Publ. 192 p. (in Russian)
2. Bondarenko P.M., Luchitskiy I.V. (1969) On the tension fields in the folds resulting in longitudinal band. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **188**(4), 878-880. (in Russian)
3. Gzovskiy M.V. (1975) *Osnovy tektonofiziki* [Fundation of tectonophysics]. Moscow, Nauka Publ., 536 p. (in Russian)
4. Goncharov M.A., Talitskiy V.G., Frolova N.S. (2005) *Vvedenie v tektonofiziku* [Introduction to tectonophysics]. Moscow: KDU Publ., 496 p. (in Russian)
5. Ivanov S.N. (1998) *O reologicheskikh modelyakh zemnoy kory; kriticheskoe rassmotrenie* [On the rheological models of the Earth's crust; A critical examination] Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ. 41 p. (in Russian)
6. Kisin A.Yu. (2005) On the problem of thrust faults in the Earth's crust "Tektonika zemnoy kory I mantii. Tektonicheskie zakonomernosti razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh" *Materialy XXXVIII Tektonicheskogo soveshchaniya*. T. 1. [Tectonics of the Earth's crust and mantle. Tectonic patterns of distribution of minerals. Proc. 38-th Tectonic Conference. V. 1, 285-288. (in Russian)]
7. Kisin A.Yu. (2009) The structural position and the formation of vein-disseminated ores Safianovka Zn-Cu deposit (Middle Ural). *Litosfera*, (5), 72-84. (in Russian)
8. Kisin A.Yu., Koroteev V.A. (2007) All-crust folding of mobile belts. *Dokl. Akad. Nauk*, **415**(5), 646-650. (in Russian)
9. Kisin A.Yu., Koroteev V.A. (2009) Stress tension gradients as the cause of motion of matter during all-crust folding. *Dokl. Akad. Nauk*, **424**(1), 67-70. (in Russian)
10. Koroteev V.A., Kisin A.Yu., Sazonov V.N. (1998) The model of fold belts formation in the collision stage (based on the horizontal compression bend). *Dokl. Akad. Nauk*, **358**(4), 508-510. (in Russian)
11. Leonov M.G. (2008) *Tektonika konsolidirovannoy kory*. Tectonics of consolidated crust. Moscow, Nauka Publ. 464 p. (in Russian)
12. Leonov Yu.G. (1991) Platform tectonics in the light of tectonic layering of the crust. *Geotektonika*, (6), 3-20. (in Russian)
13. Leonov Yu.G. (1994) The structure of the lithosphere in the reflected waves. *Geotektonika*, (4), 85-88. (in Russian)
14. Leonov Yu.G. (1997) Tectonic mobility of the platform crust at various depth levels. *Geotektonika*, (4), 3-23. (in Russian)
15. Makarov V.I. (1977) *Noveyishaya tektonicheskaya struktura Tsentral'nogo Tyan'-Shanya* [The newest tectonic structure of the Central Tien-Shan. Moscow, Nauka Publ., 171 p. (in Russian)]
16. *Metody modelirovaniya v strukturnoy geologii*. (1988) (Eds. V.V. Belousov, A.V. Vikhert). [Methods of modeling in structural geology (Eds V.V. Belousov, A.V. Vikhert)] Moscow, Nedra Publ., 222 p. (in Russian)
17. Nikishin A.M. (2002) *Tektonicheskie obstanovki. Vnutriplitnye i okrainnoplitnye protsessy* [Tectonic environment. Intraplate and borders-plate processes.] Moscow St. Univ. Publ., 366 p. (in Russian)
18. Ramberg Kh. (1985) *Sila tyazhesti i deformatsii v zemnoy kore* [Gravity and deformations in the Earth's crust]. Moscow, Nedra Publ., 399 p. (in Russian)
19. *Tektonicheskaya rassloennost' litosfery*. (1980) [Tectonic stratification of the lithosphere] Moscow, Nauka Publ., 215 p. (in Russian)
20. *Tektonicheskaya rassloennost' litosfery noveyishikh podvizhnykh pojasov*. (1982) [Tectonic stratification of the lithosphere of the latest mobile belts]. Moscow, Nauka Publ. 115 p. (in Russian)
21. *Tektonicheskaya rassloennost' litosfery i regional'nye geologicheskie issledovaniya*. (1990) [Tectonic stratification of the lithosphere and regional geological studies]. Moscow: Nauka, 293 p. (in Russian)
22. Terkot D., Shubert Dzh. (1985) *Geodinamika: geologicheskie prilozheniya fiziki sploshnykh sred. Ch. 1*. [Geodynamics: Geological applications of continuum physics Ch. 2.]. Moscow, Mir Publ., 374 p. (in Russian)
23. Khain V.E., Yablonskaya N.A. (1997) Structural drawing of the Alpine-Himalayan and Central Asian mountain belts upper crust as a reflection of an elastic-plastic deformations. *Dokl. Akad. Nauk*, **353**(5), 655-658. (in Russian)
24. Sherman S.I. (1984) *Fizicheskiy eksperiment v tektonike i teoriiya podobiya*. [The physical experiment in the tectonics and the theory of similarity] *Geol. Geofiz.* (3), 8-18. (in Russian)
25. Yudakhin F.N., Shchukin Yu.K., Makarov V.I. (2003) *Glubinnoe stroenie i sovremennye geodinamicheskie protsessy v litosfere Vostochno-Evropeyskoy platformy* [Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European platform. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 300 p. (in Russian)]
26. Yakovlev F.L. (2001) A study of the mechanism of line folding as one of the areas tectonophysics. *Bul. MOIP. Otd. Geol.* **76**(4), 7-15. (in Russian)
27. Carey S.W. (1971) The Reid Concept in Geotectonics. *Nature*, **230**, 42-45.
28. Ivanov S.N., Ivanov K.S. (1993) Hydrodynamic Zoning of the Earth's crust and its Significance // *J. Geodynamics*, **17**(4), 155-180.
29. Willis B. (1892) Mechanics of Appalachian Structure. *U.S. Geol. Survey. An. Rept.*, **13**(2), 213-281.