

СТРУКТУРОПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ РОЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ В БЛОКЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ИЗГИБА (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

А. Ю. Кисин

Структурный контроль месторождений полезных ископаемых – общеизвестный факт. Происхождение самих рудоконтролирующих структур во многих случаях не раскрывается. Исследователи в таких случаях обычно ограничиваются описанием структур с той или иной степенью детальности, указывая на режим сжатия, растяжения или сдвига. Для разрывных нарушений обычно указывается их кинематика. Чаще всего упоминаются надвиги и взбросы. Из экспериментальных работ хорошо известно, что надвиговые структуры возникают либо в результате действия приложенной извне тектонической силы, либо в результате действия внутренних сил. Для месторождений прожилковых и прожилково-вкрапленных руд характерно дорудное образование зон объемной трещиноватости. Область объемной трещиноватости под действием внешних сил возникнуть не может, поскольку катаклазированная порода неспособна передавать тектонические напряжения на расстояния. Для ее образования нужны внутренние сжимающие напряжения. Как могли возникнуть локальные участки внутренних сжимающих напряжений в земной коре на верхних ее горизонтах? Объемные напряжения характерны для изгибной тектоники [1]. Для выяснения роли изгибных деформаций в дорудной подготовке структур была проведена серия экспериментов с моделированием зоны сжатия блока отрицательного изгиба.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для эксперимента использовался шелевидный стеклянный бокс с одной продольной подвижной стенкой. Заготавливалась форма в виде пластиковой полоски шириной 13 мм с закрепленными по краям деревянными треугольниками, имитирующими лежащие бока надвигов. Пластиковая полоска в эксперименте играла роль нейтральной поверхности. Форма устанавливалась в бокс и послойно засыпалась песком разной окраски. Затем пески смачивались раствором поваренной соли и высушивались, что вело к их слабой цементации. Длина модели по верху – 41 см, высота – 5,5 см, ширина – 1,3 см. Такая ширина приближала модель к двумерной, удобной для изучения. Деформации модели производились подъемом ее за концы пластиковой полоски, либо провисанием модели на опорах, установлен-

ным по ее краям. Подвижная боковая стенка позволяла понизить эффект бокового распора. Результаты всех экспериментов этой серии отличались деталями, но в целом были однотипными. Результаты одного эксперимента этой серии показаны на рис. 1.

Сразу после начала эксперимента, при кривизне изгиба до 10° , вдоль боковой поверхности, имитирующей надвиг, параллельно ей возник сдвиг, по кинематике отвечающий надвигу (рис. 1а, цифра 1).

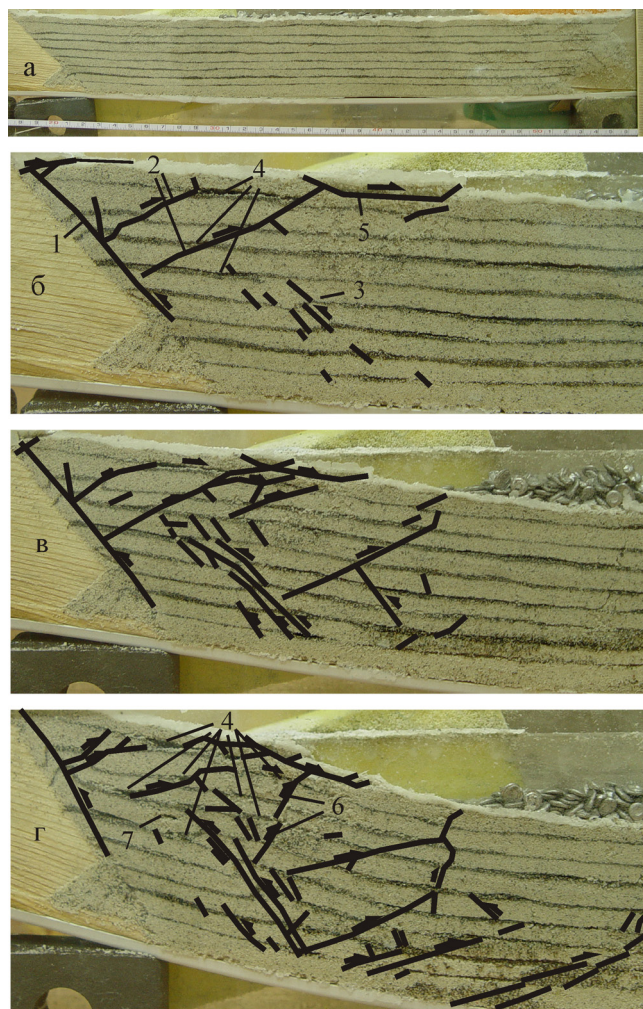


Рис. 1. Эксперимент по моделированию зоны сжатия блока отрицательного изгиба: исходное положение (а), деформации при кривизне изгиба 10° (б), 18° (в) и 30° (г).

Пояснения см. текст.

Он отчетливо проявлен в верхней части модели и постепенно затухает книзу. В висячем боку надвига (далее главного надвига) отчетливо проявилось три дуплекса скалывания, также с кинематикой надвигов (цифра 2). Поверхности сместителей почти параллельны. В углу образованном плоскостями главного надвига и второго дуплекса возникло антиклинальное вздутие, расщепленное слепой субвертикальной трещиной растяжения, поднимающейся снизу вверх. Ниже дуплексов скалывания 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. 1в показаны деформации модели при кривизне 18° . Ранее возникшие дуплексы трещин скалывания остаются активными и показывают тенденцию к выполаживанию. На более глубоких горизонтах появились новые дуплексы той же ориентировки и кинематики. Слепые трещины (цифра 3) удлинились, и произошла локализация сдвига. Часть мелких трещин этого типа потеряла активность. В направлении к осевой части изгиба возникли дополнительные трещины данной ориентировки и кинематики. Зона брекчирования верхней части модели продолжает разрастаться. Продолжается увеличение амплитуды антиклинального вздутия. Примечательно, что на самом верхнем горизонте данная структура почти не проявилась.

На рис. 1г показаны деформации модели при кривизне 30° . Система трещин, 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, более крупного антиклинального вздутия. Сильно возросло количество полостей отслоения. Количество и объем их возрастает к верхней части модели. Появились одиночные внутрислоевые трещины вертикального растяжения (цифра 7), что еще больше увеличило пустотное пространство. Нижняя часть крупного дуплекса трещин скалывания (третий сверху на рис. 1б) отмерла, а активизировалась межслоевая граница.

Осевая часть изгиба на рисунках не показана, поскольку здесь имелись только квазипластические

деформации, вызывающие лишь утолщение слоев. Не показана и правая часть модели, поскольку стиль ее деформаций такой же, как и в левой части.

ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте с моделированием блока отрицательного изгиба получены интересные результаты, объясняющие механизм деформирования пород при блоковой складчатости. Но данный эксперимент не полностью соответствует блоковой складчатости земной коры, поскольку здесь нейтральная поверхность материальная, зафиксированная в пластиковой полоске в основании блока. В реальной ситуации нейтральная поверхность виртуальная, и столь значительного прогибания слоев не будет. Чтобы представить такую блоковую складчатость, надо мысленно приподнять правую часть рис. 1б-г почти до горизонтального положения, не меняя положение левой части модели. Это увеличит амплитуды смещений по имеющимся трещинам, увеличит количество трещин в направлении осевой части и создаст осевое поднятие, но не изменит общий стиль деформаций. С этой оговоркой данный эксперимент отвечает условиям блоковой складчатости.

Возникновение дуплексов трещин скалывания и их кинематика объясняются вращением плоскости главного надвига по часовой стрелке. Такое вращение вызывает сокращение горизонтальных размеров блока прямо пропорционально расстоянию до его подошвы. Следовательно, угол между плоскостью главного надвига и поверхностью блока увеличивается. Меняется геометрия объема, что обеспечивается образованием данных дуплексов с надвиговой кинематикой. В точке их сочленения с главным надвигом смещения равняются нулю, а на противоположном конце они достигают максимума, но остаются малоамплитудными. Образованный главным надвигом и дуплексом клин испытывает горизонтальное сжатие, равное нулю в точке их сочленения и достигающего максимума вверху. В верхней части клина сжимающие напряжения снимаются брекчированием и межслоевым проскальзыванием. Ниже образуется антиклинальное вздутие. Выжимание клина вверх по плоскостям ограничивающих его трещин и изменением геометрии объема вызвало образование в его основании условия всестороннего растяжения и возникновение слепой вертикальной трещины. От основания клина вверх растяжение принимает ориентированный характер (в вертикальной плоскости) и достигает максимума у поверхности блока. Совместное действие сжимающих и растягивающих сил вызывает расслоение клина и брекчирование его верхней части.

Система трещин, обозначенных цифрой 3, обусловлена деформациями по механизму простого сдвига, связанного с изменением геометрии объема

и выжиманием материала из ядра складки вверх. По обе стороны от осевой поверхности возникли касательные напряжения с доминантой движения материала вверх и к краевым частям блока, энергетически наиболее выигрышной. Касательные напряжения обуславливают и катакластическое (квазипластические) течение материала и в осевой части изгиба, но здесь оба вектора симметричны и равнозначны, что для объема в целом определяет деформацию чистого сдвига: горизонтальное сжатие, вертикальное растяжение, с общим удлинением только вверх. По мере удаления от осевой поверхности возрастает доминанта одного из векторов движения вещества. Такой краевой частью, где эта доминанта отчетливо проявилась, является система трещин под цифрой 3. Первоначально мелкие слепые трещины скалывания этой системы (в реальности их значительно больше, чем показано на рис. 3) быстро разрастались с локализацией сдвига на наиболее крупных из них. В результате значительная часть ранних трещин потеряла активность. Движению вещества в верхней части сдвига препятствуют дуплексы трещин скалывания и поле касательных напряжений, вызванных вращением главного надвига. Это переориентирует движение материала по восходящей в направлении оси изгиба. Кроме того, данная система простого сдвига (обозначенные цифрой 3) под влиянием вращения главного надвига и его висячего бока в целом также испытывает вращение по часовой стрелке. Это сопровождается возникновением новой системы дуплексов, уже генетически связанных с ней (рис. 1в, г). Избыток материала в головной (верхней) части сдвига создает свое поле напряжений, для снятия которых образуется взброс (рис. 1г, цифра 6). Возникает новое антиклинальное вздутие. Здесь горизонтальное сжатие и вертикальное растяжение вызвали более значительное расслаивание модели с образованием значительного пустотного пространства.

При внимательном рассмотрении деформированной модели мы видим, что трещины, обозначенные цифрами 2 и 3, подобны и имеют одинаковые углы с поверхностью блока. Те и другие связаны с одним полем касательных напряжений, меняется только доминанта движений вещества и условия возникновения разрывов. Быстрые деформации и приповерхностные условия привели к быстрой локализации сдвиговых напряжений в виде дуплексов трещин скалывания (рис. 1б), а медленные сдвиговые деформации в более глубоких условиях создали вначале зону объемной трещиноватости

(цифра 3) и только позднее – протяженные трещины. Амплитуды смещений по всем трещинам максимальные около верхней границы блока и падают до нуля внизу. Можно сделать заключение, что амплитуда смещений верхнего конца трещины прямо пропорциональна ее протяженности по падению.

При деформации земной коры по данной модели на верхних горизонтах образуется зона брекчий и мегабрекчий. Мощность зоны зависит от реологических свойств пород и, вероятно, не превышает 1.5 км. Пустотное пространство заполняется метеорными или морскими водами. Ниже располагается область объемной трещиноватости. Трещины растут сверху вниз по двум главным направлениям касательных напряжений, что создает систему тектонических клиньев. Все трещины характеризуются взбросово-надвиговой кинематикой. Наиболее крупные трещины достигают нейтральной поверхности, но не пересекают ее. Амплитуда взбросо-надвигов максимальная сверху и близка к нулю в их нижней части. Все взбросо-надвиги малоамплитудные и сопровождаются плащеобразными зонами брекчирования.

В блоке отрицательного изгиба на прогрессивном этапе действует обратный (запирающий) градиент стрессовых напряжений [1]. Это ведет к накоплению глубинных флюидов, особенно в нижней части коры, их перегреву и обогащению рудными компонентами. Снятие стрессовых напряжений вызывает интенсивное перемещение рудоносных флюидов на верхние горизонты коры. Наиболее крупные разломы, образовавшиеся на прогрессивном этапе деформаций, играют роль рудоподводящих разломов. В зонах брекчирования на верхних горизонтах коры происходит смешение термальных ювенильных вод с холодными метеорными или морскими водами, что является благоприятным фактором массового рудоотложения.

Таким образом, экспериментальное моделирование показало, что внутренние (объемные) напряжения в зоне сжатия блока отрицательного изгиба играют главную роль в подготовке рудоконтролирующих и рудовмещающих структур на предрудном этапе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кисин А.Ю., Коротеев В.А. Градиенты стрессовых напряжений – как причина перемещения вещества при общекоровой складчатости // Докл. АН. 2009. Т. 424. № 1. С. 67–70.