

СТРУКТУРЫ РАЗРУШЕНИЯ В ГЛУБИНЕ ЗОН СДВИГАНИЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ю.Л. Ребецкий, А.В. Михайлова, Л.А. Сим

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что структурные особенности деформирования участков земной коры, обусловленные действием механизма горизонтального сдвига, хорошо изучены. Начиная с 20-х годов прошлого века выполнено множество экспериментов на моделях из влажных глин, песка, парафина. В них Г. Клоос, В. Ридель, Э. Клоос, Д. Миид, Дж. Чаленко, М.В. Гзовский, С. Стоянов, В.Д. Парфенов, С.А. Борняков, А.В. Михайлова и др. изучали структуры разрушения и деформирования, возникающие в моделях. Результатом этих экспериментов являются наблюдения за поверхностью моделей, определяющие кулисообразное расположение трещин сдвига (R - и R' -сдвиги) вдоль формирующейся зоны сдвига, появление трещин отрыва и эшелонов складок в соответствии с ориентацией осей сжатия и растяжения. Установлена зависимость ориентации этих структур от того, в какой обстановке (дополнительное сжатие или растяжение) осуществляется сдвигание. Обобщения результатов моделирования и наблюдаемых природных структур разрушения, выполненное в работах [Hancock, 1985; Sylvester, 1988], стали каноническими, определяющими для геологов и геофизиков возможность интерпретации природных геологических объектов.

Однако в настоящее время возникла потребность нового анализа состояния горных пород в зонах сдвига и пересмотра некоторых результатов модельных экспериментов. Это прежде всего связано появлением новых геофизических данных. Если ранее наблюдение деформационных структур геологами осуществлялось на дневной поверхности, что соответствовало наблюдениям на поверхности модели в экспериментах, то в настоящее время развитие геофизических методов позволило выделять и анализировать морфологию структур разрушения на глубине. В связи с этим встает вопрос, а какие структуры мы должны увидеть на глубине в зонах сдвига, такие же, как на поверхности, или нет? Определенные попытки ответа на этот вопрос были сделаны в работе [Naylor, et al., 1986], но они носили чисто теоретический характер и не подкреплялись количественным анализом и интерпретацией с позиций механики разрушения.

Следует также особо отметить, что попытки

в ходе теоретических обобщений [Hancock, 1985; Sylvester, 1988] совместить структуры разрушения, наблюдаемые в природных зонах сдвигов, и результаты экспериментов не всегда обоснованы из-за сложности выделения структур разрушения образующихся на разных стадиях структурных преобразований. Здесь прежде всего следует разделять опережающие трещины, формирующиеся в исходном поле напряжений до начала формирования зоны сдвига, и опережающие трещины третьего ранга, возникающие в самих зонах сдвига вблизи концевых участков крупных трещин второго ранга [Чернышев, 1983; Семинский, 2003]. Кроме того такое совмещение результатов наблюдения природного и экспериментального объектов требует повторения в физической модели помимо условий нагружения еще и условий, которые мы не имеем возможности контролировать. Это прежде всего изменение в процессе формирования структур флюидного давления, действующего в трещинно-поровом пространстве горных породах. Давление флюида, согласно теории Кулона – Мора [Надаи, 1936] и экспериментам Терцаги [Terzaghi, 1943] является определяющим для развития структур хрупкого разрушения и может резко изменяться при переходе от исходного состояния к состоянию, отвечающему началу или самому этапу формирования зоны сдвига.

Вопрос о морфологии структур разрушения на глубине (их пространственная ориентация и тип смещений) актуален также из-за трудности выполнения при физическом эксперименте условий подобия по одному из важнейших типов воздействия на горные породы – гравитационным силам [Рамберг, 1970; Шеменда, 1983]. Ответ на этот вопрос потребовал не только обзор литературы, в которой описывались постановка и результаты лабораторных экспериментов по формированию зоны скалывания (сдвига) в лабораторных моделях (физическое моделирование), но и анализа результатов математического моделирования напряженно-деформированного состояния, отвечающего подобным моделям.

Этот обзор позволил выявить причину различия в морфологии структур деформирования и разрушения, наблюдаемым в экспериментах разных авторов. Наш анализ показал, что эти разли-

чия связаны как с малыми вариациями влажности глины, так и с разным типом материалов, используемым при физическом моделировании: глины, песок, парафин, канифоль и др., а также с определенными различиями в условиях нагружения моделей, применяемым разными экспериментаторами.

Теоретический анализ позволил установить определяющую роль гравитационных сил (при выполнении соответствующего условия подобия) на тип смещений по разрывам, формирующимся в глубине зон сдвига. При этом с приближением к поверхности модели влияние гравитационных сил на кинематику разрывов уменьшается.

С позиции наблюдаемой морфологии деформационных и разрывных структур разного ранга все эксперименты можно подразделить на две группы. В одной после нагружения происходила локализация сдвиговых трещин второго ранга в виде узкой зоны деструкции, преобразующейся на завершающей стадии в магистральную сдвиговую трещину первого ранга, а в другой подобной локализации не было и структуры разрушения распределялись квазиоднородно. Отметим, что неоднородность развития деформаций в моделях могла проявляться не только в латеральном направлении (плоскости модели), но и по глубине. Подобные различия в стиле деформирования связаны с условием нагружения модели, которое осуществлялось различным об-

разом, как через ее торцы, так и через подошву (рис. 1). Ниже будут представлены выводы, которые следуют из результатов физического моделирования.

Предварительно укажем, что далее под трещинами первого ранга, образующимися в моделях, будем понимать трещины, линейный размер которых сопоставим с размерами модели. Трещинами второго ранга будут именоваться трещины, размер которых на один – полтора порядка меньше размера модели, формирующиеся с началом развития дизъюнктивной стадии. Трещины, образующиеся в концевых частях трещин второго ранга, связанные с концентрацией напряжений в этих областях, будут именоваться трещинами третьего ранга. В рамках этих же линейных критериев будем различать параметры напряжений первого и второго ранга.

Далее в коротком обзоре будут обсуждаться результаты моделирования структур разрушения в зоне горизонтального сдвига в моделях на влажных (около 40%) коалиновых и серых глинах. Модели на песке, парафине, воске и канифоли [Парфенов, Жуковский 1966; Emmos, 1969; Tanner, 1962 Mead, 1920] имеют существенные отличия по механическим и прочностным свойствам и здесь представлены не будут. В обзоре также будут приведены результаты изучения напряжений в зоне сдвига, полученные в моделях на желатине (поляризационно-оптический метод) без формирования структур разрушения.

МОДЕЛИ ОДНОРОДНОГО СДВИГА

Эксперименты [E. Cloos, 1955], в которых нагружение через гибкую металлическую сетку осуществлялось по подошве слоя из влажной глины, так, как это показано на рис. 1, определяли с самого начала формирование напряженно-деформированного состояния первого ранга, квазиоднородного в объеме все модели. В соответствии с терминологией, используемой в механике [Надаи, 1928], первый (рис. 1, *a*) из показанных способов (механизмов) нагружения формирует в модели деформированное состояние чистого сдвига, а второй (рис. 1, *b*) – простого сдвига. Для обоих состояний средние в объеме всей модели тензоры напряжений и приращений деформаций, формируемые указанными способами нагружения одинаковые. При этом алгебраически максимальное σ_1 и минимальное σ_3 главные напряжения (приращения деформаций) ориентированы горизонтально, равны по величине и противоположны по знаку, а промежуточное главное девиаторное напряжение σ_2

щение деформаций) ориентировано вертикально и равно нулю (рис. 2, *a*). Различия между этими состояниями связаны с кинематикой плоскостей, совпадающих на начальной стадии с плоскостями действия максимальных касательных напряжений (плоскости, содержащие в себе ось промежуточного главного напряжения и делящие угол между осями двух других главных напряжений пополам): во втором случае одна из таких плоскостей остается в процессе деформирования параллельной самой себе, а в первом обе эти плоскости поворачиваются (рис. 2, *b*, *в*).

Далее мы подробно остановимся на этом моменте и его влиянии на характер трещинообразования. Отмеченные особенности механизмов нагружения определяют характер развития разрывных структур, возникающих в процессе эксперимента по всей площади модели. Общим этих способов нагружения является то, что даже на дизъюнктивной стадии в моделях не возникает областей выраженной локализации хрупких разрывных структур, сопрягающихся с менее де-

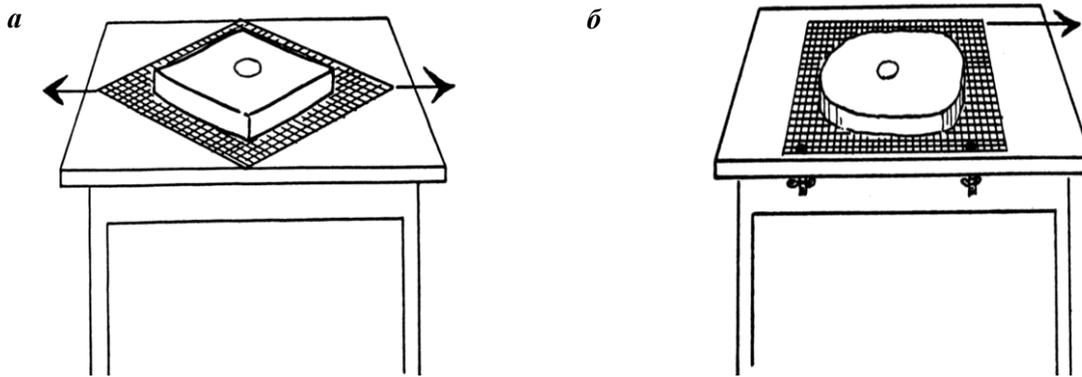


Рис. 1. Две схемы нагружения [Е. Cloos, 1955; и др.], определяющие формирование начального напряженного состояния, однородного по всей модели: чистый сдвиг (а), простой сдвиг (б)

формируемыми участками. На рис. 3 показаны фотографии поверхности модели для экспериментов, выполненных на влажных глинах Э. Клоосом [Е. Cloos, 1955]. Для модели простого сдвига (рис. 3, а, б) ось максимального удлинения эллипса ориентирована под 40° к оси сдвига (ориентация стрелок), а сопряженные трещины группируются в разных объемах модели. Для модели чистого сдвига (рис. 3, в, г) главные оси эллипсов определяют направления сжимающего и растягивающего напряжения, сопряженные трещины скалывания формируют ромбическую сетку, в тупом угле которой находится ось максимального укорочения (напряжения максимального сжатия). Формирующаяся на начальной стадии сетка трещин густо покрывает всю площадь моделей. На этой стадии трещины мелкие, их размер много меньше характерного размера модели, поэтому их можно классифицировать как разрывные структуры второго ранга.

По мере дальнейшего нагружения трещины становятся более выраженными, объединяются, переходя постепенно в структуры первого ранга, и при этом частота их возникновения более или менее сохраняется. Отметим, что плоскости трещин для обоих механизмов нагружения не совпадают с положением площадок действия максимальных касательных напряжений и отвечают положению плоскостей скалывания (точки C_i , $i = 1, 2$ на рис. 4). Для механизма нагружения простого сдвига появляющиеся в модели две системы трещин скалывания (рис. 3, б) ориентированы соответственно под углом 18° и 80° к оси сдвига (горизонтальные стрелки на рис. 3, а, б). Половина острого угла между плоскостями этих трещин, определяет угол площадок скалывания (угол между плоскостью трещины и осью напряжений максимального сжатия), равный 41° и значение коэффициента внутреннего трения k_f для влажной глины, близкое к 0.15.

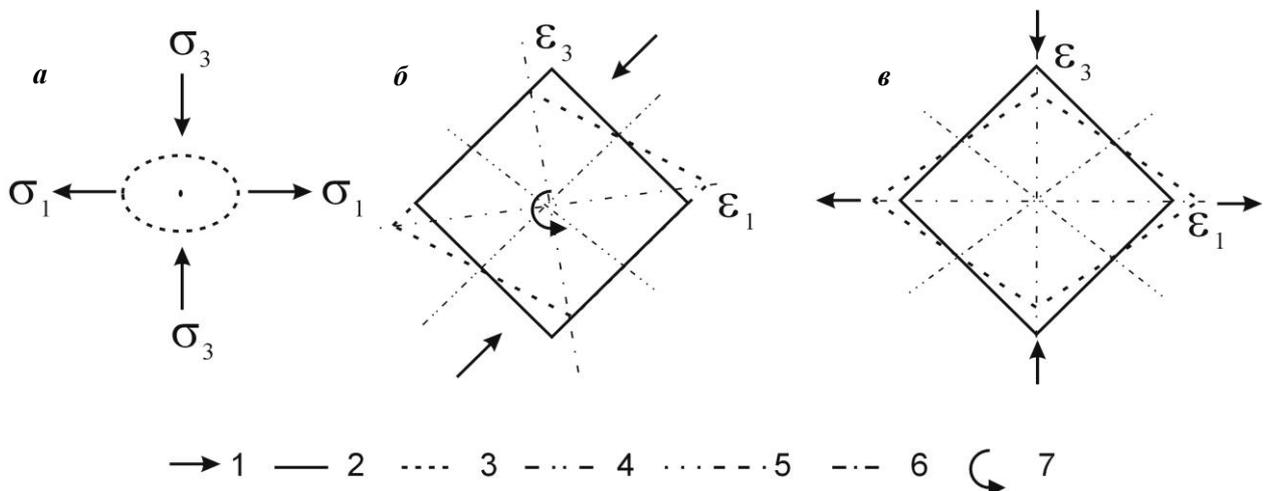


Рис. 2. Схемы напряжений (а) и кинематики – приращений деформаций (б, в) для режимов нагружения простого (б) и чистого сдвига (в). Оси промежуточного главного напряжения и приращений деформаций перпендикулярны плоскости рисунка.

1 – оси главных напряжений и деформирующих усилий, 2 и 3 – геометрия до и после нагружения, 4, 5 – оси сдвига, не испытывавшие (б) и испытывавшие поворот при деформировании (б, в), 6 – оси приращений главных деформаций (б, в), 7 – направление среднего вращения объекта, вращение одной из осей сдвига (б)

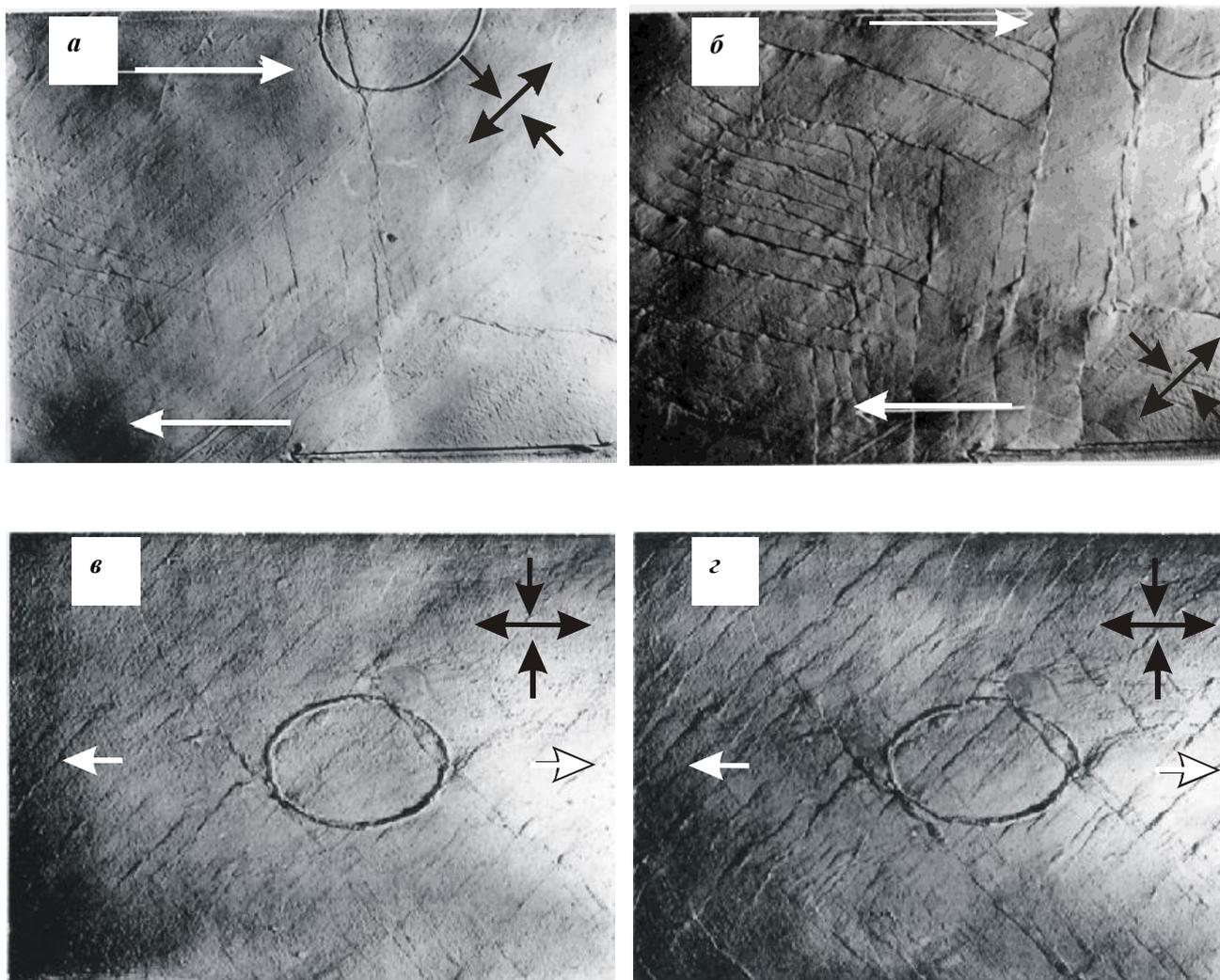


Рис. 3. Фото поверхности моделей при механизме нагружения в виде однородного простого сдвига (*а, б*) и чистого сдвига (*в, г*) [Е. Cloos, 1955] для начальной (*а, в*) и более продвинутой (*б, г*) дизъюнктивной стадии процесса деформирования (белые стрелки – направление относительного движения металлической сетки, черные стрелки – оси главных напряжений, деформаций)

Заметим также, что биссектрисы смежных углов между этими системами трещин (оси деформаций максимального укорочения и удлинения) составляют с осью сдвига углы в 59° и 31° , что вместе с отмеченной выше ориентацией длинной оси эллипса определяет наличие в процессе нагружения небольшого поперечного к оси сдвига поддавливания. Такое поддавливание связано с самим нагружающим устройством – металлической сеткой (рис. 1, *а*), которая при перекашивании уменьшает расстояния вкрест оси сдвига, создавая дополнительное сжатие.

Для механизма нагружения чистого сдвига острый угол между сопряженными трещинами скальвания (биссектриса угла – ось максимального сжатия) близок к $88-90^\circ$ (рис. 3, *г*). Площадки скальвания отклоняются на угол $1-2^\circ$ от плоскости действия максимальных касательных напряжений. Это говорит о том, что в данном эксперименте влажные глины находятся вблизи

истинно пластического течения при коэффициенте внутреннего трения k_f , близким к нулю, когда нормальные напряжения практически не влияют на ориентацию площадок скальвания.

Для механизма простого сдвига сколы сопряженной ориентации группировались в разных локальных участках модели, при этом на более продвинутой стадии деформирования (рис. 3, *б*) некоторое преимущество получила система сколов, составляющая с осью сдвига острый угол. Для механизма чистого сдвига распределение сопряженных систем трещин выглядит более равномерным, а обе системы представляются более равноправными (рис. 3, *г*). Подобное различие в формировании структур разрушения хорошо объясняется с позиции теории Кулона – Мора и кинематических различий этих двух механизмов нагружения. Как следует из рис. 2, *в* при механизме чистого сдвига плоскости трещин скальвания испытывают одинаковый разворот,

что определяет их равноправное развитие в процессе дальнейшего нагружения рис. 4, б.

Другая ситуация имеет место для механизма простого сдвига. Здесь образовавшиеся на начальной стадии трещины сопряженных систем скалывания испытывают разные углы вращения (рис. 2, б). Система трещин, имеющих углы с осью сдвига близкие к 80° наиболее быстро в процессе нагружения изменяет свою ориентацию. Их плоскости постепенно переходят на участок диаграммы Мора, характеризующийся большими величинами нормальных сжимающих напряжений рис. 4, а.

Подобная обстановка деформирования должна приводить к тому, что образовавшиеся хрупкие трещинки будут постепенно переходить в неактивное состояние из-за увеличивающихся на их бортах сил трения. Сопряженная система трещин, мало отклоняющихся от оси сдвига, практически не испытывает разворота в процессе деформирования, оставаясь практически в одном и том же положении на диаграмме Мора и поэтому будут постоянно находиться в активном состоянии.

В представленных выше результатах экспериментов оба механизма нагружения простого и чистого сдвига создают напряженное состояние, отвечающее тектонической обстановке горизонтального сдвига, в которой активные трещины

имеют смещения в виде сдвига по простиранию. Следует заметить, что в этих же экспериментах достаточно часто наблюдается развитие вместо систем трещин скалывания систем трещин отрыва (см. рис. 5). Эти трещины ориентируются в соответствии с расположением оси растягивающих напряжений и для механизма простого (рис. 5, а) сдвига их плоскости составляют с осью сдвига углы близкие к $60-70^\circ$.

Трещины отрыва при чистом сдвиге (рис. 5, а) часто образуют системы, выстраивающиеся в кулисы, фактически формирующие в модели зону сдвига, по форме напоминающую зону сдвига с кулисами трещин скалывания. Оси этих кулис составляют с направлением оси максимального удлинения угол $25-30^\circ$. Если рассматривать оси кулис в качестве ориентации оси сдвига, находим, что угол скалывания в модели нагружения в виде чистого сдвига составляет около 28° .

Таким образом, в этом эксперименте коэффициент внутреннего трения глины можно считать близким к 0.5. При механизме нагружения в виде простого сдвига трещины отрыва составляют с осью сдвига угол 35° , что также как и при анализе результатов эксперимента, показанных на рис. 3, а, б, определяет наличие дополнительного поперечного к оси сдвига поддавливания.

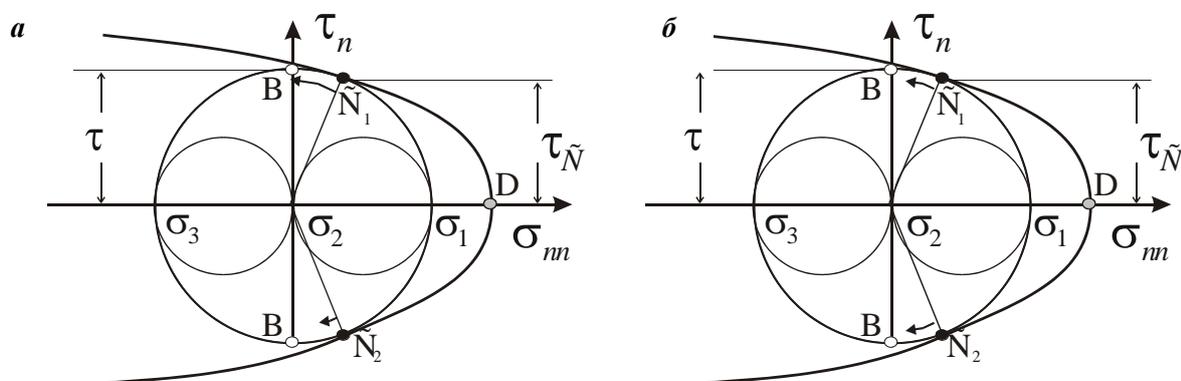


Рис. 4. Диаграммы Мора предельного напряженного состояния, определяющего касание большого круга Мора внешней огибающей (точки C_i $i = 1, 2$ отвечают углу скалывания, точки B_i - определяют положение плоскостей действия максимальных касательных напряжений), для двух типов нагружения простого (а) и чистого (б) сдвига. Стрелки указывают направления перемещения точек, отвечающих формированию трещин скалывания, вдоль большого круга Мора в процессе деформирования. Разная длина стрелок определяет разные углы поворота трещин

МОДЕЛИ ЛАТЕРАЛЬНО НЕОДНОРОДНОГО ПЛОСКОГО СДВИГА

Если в модели сдвигающие усилия приложены к диагонально противоположным вертикальным торцевым поверхностям (см. рис. 6, а), а подошва слоя имеет возможность проскальзывать без трения по основанию, то формирующееся напряженное и деформированное состояния остаются неизменными по глубине [Кокер, Файлон,

1936; Осокина, 1960, 1963; Emmons, 1969; Кобылянский, 1991], но изменяются по латерали (поперек оси сдвига) уже на самой начальной упругой стадии. Подобная ситуация неоднородного по латерали простого сдвига наблюдается также в экспериментах П.М. Бондаренко [1991], где между сдвигающимися горизонтальными под-

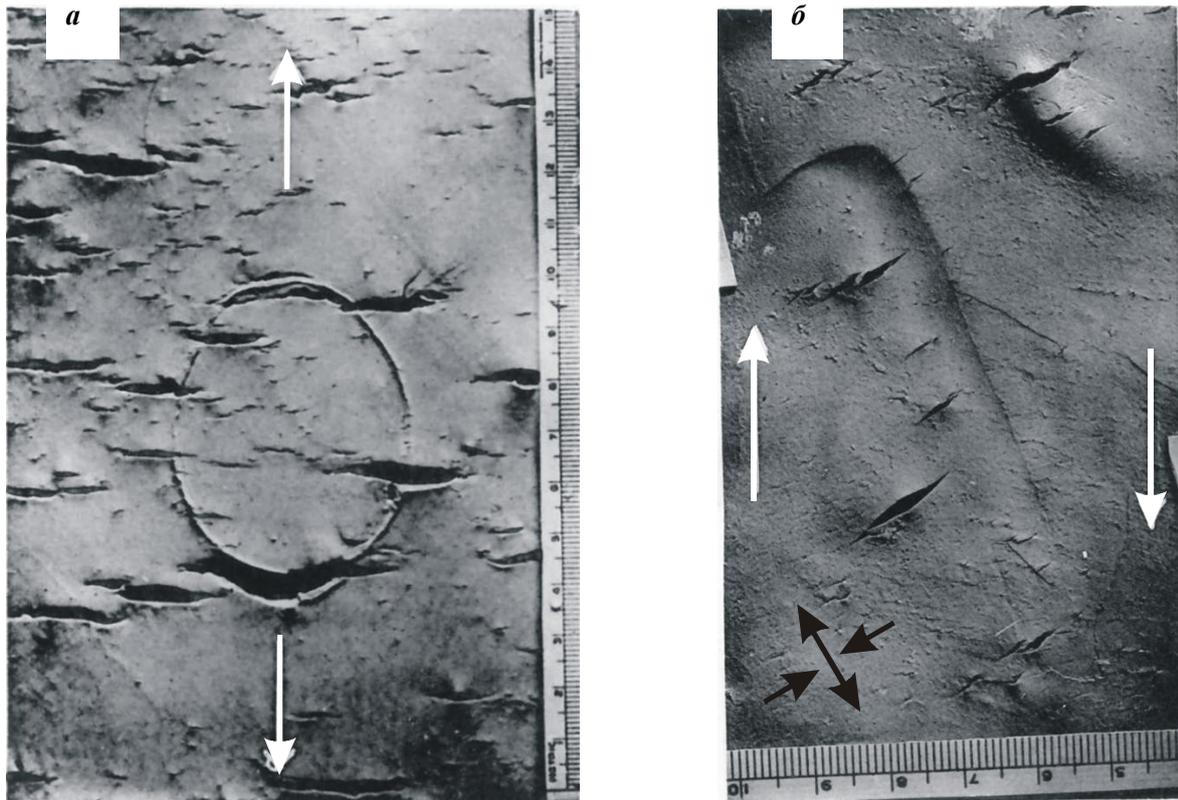


Рис. 5. Фото поверхности модели с трещинами отрыва при механизме нагружения в виде однородного чистого (а) и простого (б) сдвига [Е. Cloos, 1955]. Стрелки показывают ориентацию оси максимального удлинения (максимального растягивающего напряжения) для механизма чистого сдвига (а) и ориентацию оси сдвига для механизма простого сдвига (б) деформирования (белые стрелки – направление относительного движение металлической сетки, черные стрелки – оси главных напряжений, деформаций)

ложками на которых лежала деформирующаяся плита, имелась широкая щель, сопоставимая с мощностью слоя по линейному размеру в поперечном к оси сдвига направлении (рис. 6, б).

Формирующееся в этих экспериментах в материале модели состояние в механике именуется плоским напряженным состоянием, т.к. его параметры не изменяются по нормали к плите, а напряжения на плоскостях, параллельных поверхности, можно считать, нулевыми (если не учитывать массовые силы).

В этом случае две главные оси для алгебраически максимального и минимального главных напряжений лежат в горизонтальной плоскости,

а промежуточное главное напряжение равно нулю и направлено вертикально (см. схему ориентации главных напряжений на рис. 2, а). Для моделей рис. 6, а, б максимальные сдвиговые деформации осуществляются для точек слоя вблизи оси сдвига и по мере удаления от нее в поперечном направлении уменьшаются до нулевых значений, т.е. напряженное состояние существенно неоднородное в латеральном направлении в отличие от моделей, изображенных на рис. 6. В соответствии с установленными особенностями деформирования механизм нагружения можно именовать плоским простым сдвигом.



Рис. 6. Схема нагружения плиты в виде плоского простого сдвига – однородный по глубине простой сдвиг: а – с торцевыми штампами [Осокина, 1960, 1963]; б – продольными боковыми пластинами (подложка с широкой щелью) [Бондаренко, 1991]

Указанная особенность напряженного состояния (независимость от глубины) позволяет выполнять его изучение с использованием принципов фотоупругости [Осокина, 1960, 1963; Бондаренко, Лучицкий, 1985; Бондаренко, 1991]. На рис. 7 представлены траектории главных напряжений и плоскостей действия максимальных касательных напряжений, полученные для сочетания простого сдвига с дополнительным сжатием и растяжением. Характерным здесь является изменение угла наклона плоскостей максимальных касательных напряжений к простиранию зоны сдвига. В условиях сжатия одна система плоскостей стремится расположиться параллельно оси сдвига, а другая субортогонально к ней. В условиях растяжения происходит небольшой разворот этих плоскостей относительно оси сдвига.

В экспериментах на оптически-активных материалах, выполнявшихся П.М. Бондаренко [1991], наличие широкой щели между сдвигаю-

щимися стеклянными пластинами основания определяло формирование в широкой зоне от оси сдвига напряженного состояния, однородного по глубине, но неоднородного в крест от оси сдвига (рис. 8). Траектории главных напряжений в срединной части модели ориентированы под 45° к оси сдвига. Здесь наблюдается максимум касательных напряжений.

Заметим, что локальные максимумы этих напряжений наблюдаются также для граничных участков деформируемой полосы над стеклянными пластинами. Эти максимумы являются следствием краевого эффекта, и при увеличении размеров полосы в направлении оси сдвига их роль и влияние на осевую зону должны уменьшаться. Также точно никакого отношения к полю напряжений зоны сдвига не имеют изотропные точки (точки схождения траекторий одного из главных напряжений), расположившиеся в полосе над средней частью стеклянных пластин.

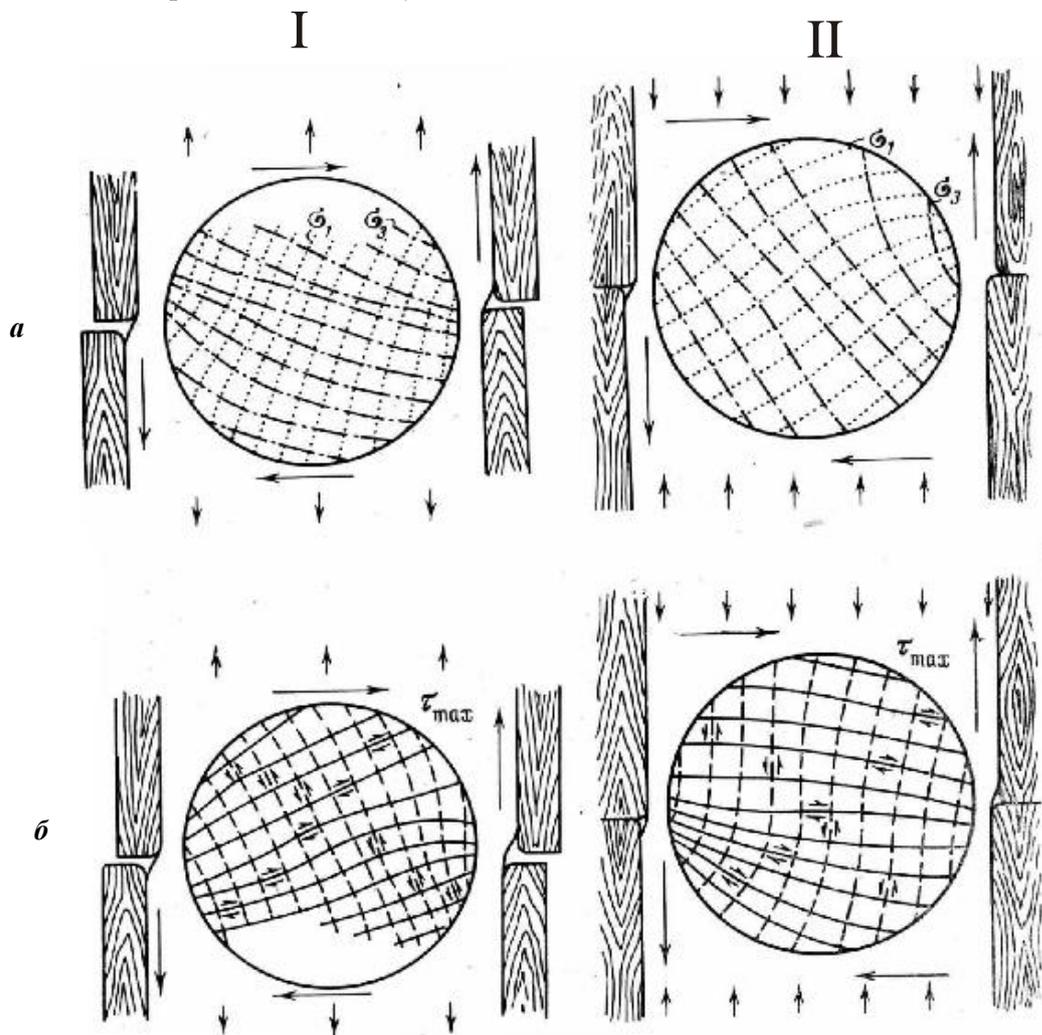


Рис. 7. Схемы нагружения плоского простого сдвига в сочетании с дополнительным растяжением (I) и сжатием (II), траектории главных напряжений (a) и плоскостей действия максимальных касательных напряжений (б) в оптически-упругих моделях [Осокина, 1960. 1963]

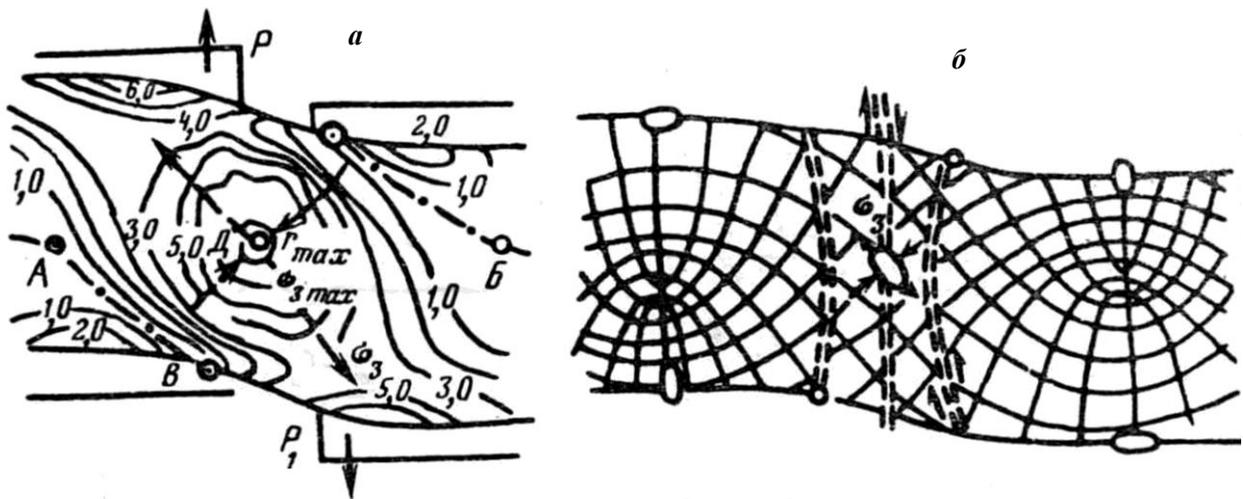


Рис. 8. Изолинии величин максимальных касательных напряжений (а) и траектории главных напряжений (б) в оптически-упругой модели плоского простого сдвига [Бондаренко, 1991]

Физическое моделирование структур разрушения, отвечающих механизму плоского простого сдвига однородного по глубине (схема нагружения представлена на рис. 6, б), восходит к экспериментам на влажных глинах Г. Клооса [Н. Cloos, 1928], В. Риделя [Riedel, 1929]. В этих экспериментах на самой ранней стадии нагружения происходит локализация пластических деформаций вблизи осевой зоны сдвига. В моделях это достигалось либо неоднородностью напряженного состояния в ее плоскости и концентрацией напряжений в осевой ее части, либо неоднородностью прочностных свойств модели (внесением дефектов в осевой зоне сдвига). Как показали эксперименты, на дизъюнктивной стадии в моделях возникают трещины сдвига типа *R*-сколов и трещины отрыва *T* (рис. 9). Формирующиеся *R*-сколы представляли собой эшелонированные кулисообразные трещины, расположенные вдоль оси зоны сдвига.

Следует отметить, что в экспериментах Г. Клооса, результаты которых представлены на фотографиях рис. 10, нагружение пластины влажной глины осуществлялось через свинцовую

подложку, которая смещалась относительно второй цинковой подложки. Подобное нагружение соответствует механизму неоднородного по глубине простого сдвига (рис. 6, б). Фотография пликативной стадии процесса, представленная на первой фотографии рис. 10, показывает, что уже на этой стадии маркирующие кружочки трансформировались в эллипсы на достаточно большом расстоянии от оси сдвига. Мы видим, что для этой стадии маркирующие линии достаточно хорошо повернуты, но остаются практически прямыми, нет *S*-образной изогнутости, характерной этому типу нагружения.

Подобная ситуация возможна, если в эксперименте на подошве глиняной плиты в широком диапазоне от оси сдвига созданы условия для проскальзывания без трения глины относительно цинковых подложек, так как это показано рис. 6, б. Косвенно об этом факте также говорят заранее нанесенные вдоль осевой части сдвига вертикальные надрезы. Они делались для того, чтобы в однородно деформирующейся сдвиговой области начался процесс локализации разрушения в заданном месте.

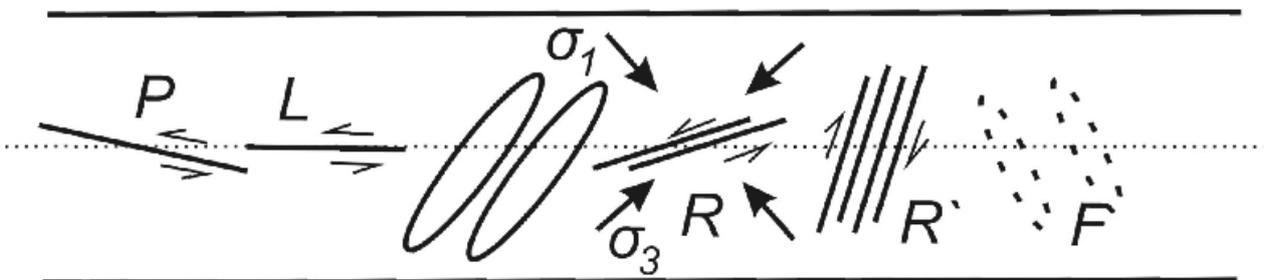


Рис. 9. Схема структур деформирования и морфологии трещин, формирующихся в зоне сдвига по работам С. Стоянова и О.Б. Гинтова. Дается ориентация главных осей напряжений (здесь σ_1 – ось максимального сжатия в отличие от принятой в настоящей работе системе индексации осей главных напряжений), трещин сдвига в виде *R*- и *R'*-сколов, трещин отрыва *T*, трещин сдвига в виде *P* и *L*-сколов, ориентация куполов складок. Штрих-пунктир – ось сдвига

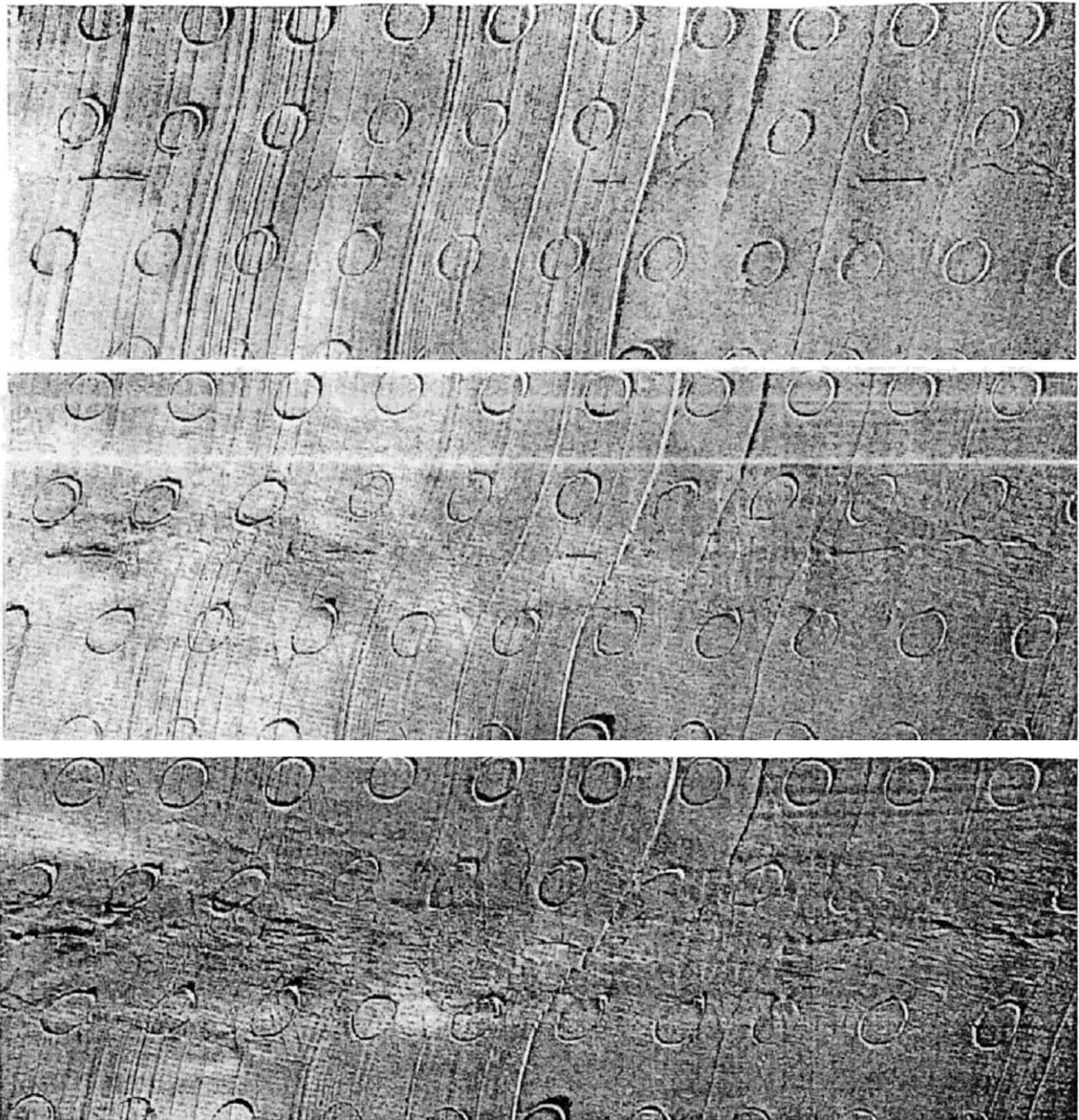


Рис. 10. Фото поверхности модели продольного правого сдвига слоя глины в эксперименте Г. Клооса [H.Cloos, 1930]. Хорошо видна система *R*-сколов, но отрывы не видны

Заметим, что на фотографиях рис. 10 наблюдаются только системы трещин, ориентированных под углом 12° к оси сдвига. В экспериментах Г. Клооса также наблюдаются и трещины отрыва *T*. Согласно рис. 11 формирование трещин отрыва одновременно с трещинами сдвига возможно для материалов, в частности, для глин, обладающих повышенной вязкостью и хрупкостью. Для них кривизна огибающей на диаграмме Мора в секторе растягивающих напряжений резко падает (рис. 11, б). В моделях Г. Клооса появление трещин отрыва обеспечивалось смазыванием водой поверхности глины. Такая процедура резко снижала прочность глины на разрыв, создавая возможность возникновения

мелкой сетки трещин отрыва на пликативной стадии задолго до появления трещин скола. Более поздние эксперименты, выполненные другими исследователями, показали, что если не делать специальных процедур, то трещины отрыва *T*-типа проявляются не всегда. Пластичные материалы, обладающие текучестью даже при относительно высоком уровне растягивающих напряжений, имеют более протяженную зону перехода от сдвига и к одноосному растяжению (рис. 11, а). Для них последний участок в секторе растягивающих напряжений более протяжен, чем для хрупких материалов, что и приводит к невозможности при чистом сдвиге одновременного возникновения трещин отрыва и скола.

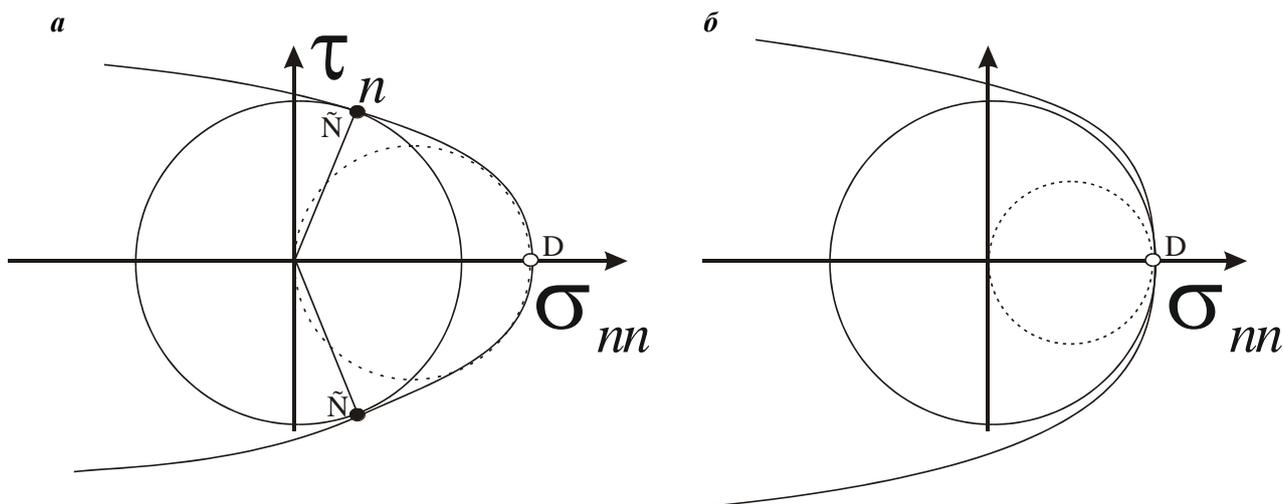


Рис. 11. Диаграммы Мора для двух предельных напряженных состояний (одноосное растяжение – пунктирный круг, чистый сдвиг – сплошной круг) и двух типов предельной кривой Мора: *а* – касание предельной параболической огибающей на участках боковых ветвей напряженного состояния чистого сдвига (точки *С*) отвечает формированию сопряженных сколов, *б* – касание круга Мора для состояния чистого сдвига предельной огибающей вблизи точки ее экстремума *Д* определяет возникновение трещин отрыва раньше, чем могли бы возникнуть сопряженные сколы для напряженного состояния, которое предполагалось достигнуть при моделировании

МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОГО ПО ГЛУБИНЕ ПРОСТОГО СДВИГА

Дальнейшее изучение структур разрушения в зоне скалывания выполнялось на моделях, нагружение в которых осуществлялось по типу, показанному на рис. 12. Главное различие этого типа нагружения от предыдущего состоит в том, что напряженное состояние, отвечающее схеме нагружения рис. 12 неоднородное не только по латерали, но и по глубине. Однако это обстоятельство ранее нигде не отмечалось, и результаты экспериментов по схемам рис. 6, *б* и рис. 12 сопоставлялись друг с другом.

Результаты эксперимента Э. Клооса [E. Cloos, 1955] представлены на рис. 13, *а*. Видна, как система *R*-сколов, представляющая собой эшелонированные кулисообразные трещины, расположенные вдоль оси зоны скалывания, частично перекрывавшие друг друга, так и трещины отрыва *T*. *R*-сколы составляли с простираем сдвиговой зоны угол в 10–20°, а трещины отрыва *T* отклонялись от оси сдвига на 45° и по простираению совпадали с ориентацией оси максимального сжатия. Важно отметить, что маркирующие линии имеют существенное *S*-образное искривление вблизи оси сдвига, которое формируется еще на пликативной стадии развития деформационного процесса. На некотором удалении от оси сдвига эти линии принимают прямолинейный вид, близкий к их положению на начальной стадии. Эта особенность является существен-

ной, определяющей более интенсивную локализацию упругих и пластических деформаций в осевой части сдвига, чем в случае нагружения по схеме рис. 6, *б*. Морфология описанных по результатам моделирования трещин согласуется с теорией Кулона – Мора (рис. 4) при значении коэффициента внутреннего трения для использованных в экспериментах глин близком к 0.55 (угол внутреннего трения около 30°). В соответствии с полученными углами наклона трещин к оси сдвига механизм нагружения и характеризуется как сдвиг без дополнительного сжатия или растяжения, поперечного к оси сдвига.

В дальнейшем были выполнены серии экспериментов по моделированию зоны сдвигов, результаты которых представлены в работах М.К. Хубберта [Hubbert, Rubey, 1959], М.В. Гзовского [1959, 1963], W.F. Tanner [1962], В.Д. Парфеновым [Парфенов, Жуковский, 1966], J.S. Tchalenko [1968, 1970], E.Z. Lajtai [1969], X. Рамберга [1970], С. Стоянова [1977]. В этих работах выполнялись детальные исследования морфологии возникающей трещиноватости во взаимосвязи с условиями ее формирования, определяемыми свойствами модельного материала и разным типом нагружения, и стадией деформирования. Показано, что угол, под которым к оси сдвига развиваются *R*-сколы, зависит от материала модели: 10–25° для глин и 20–40° для канифоли.

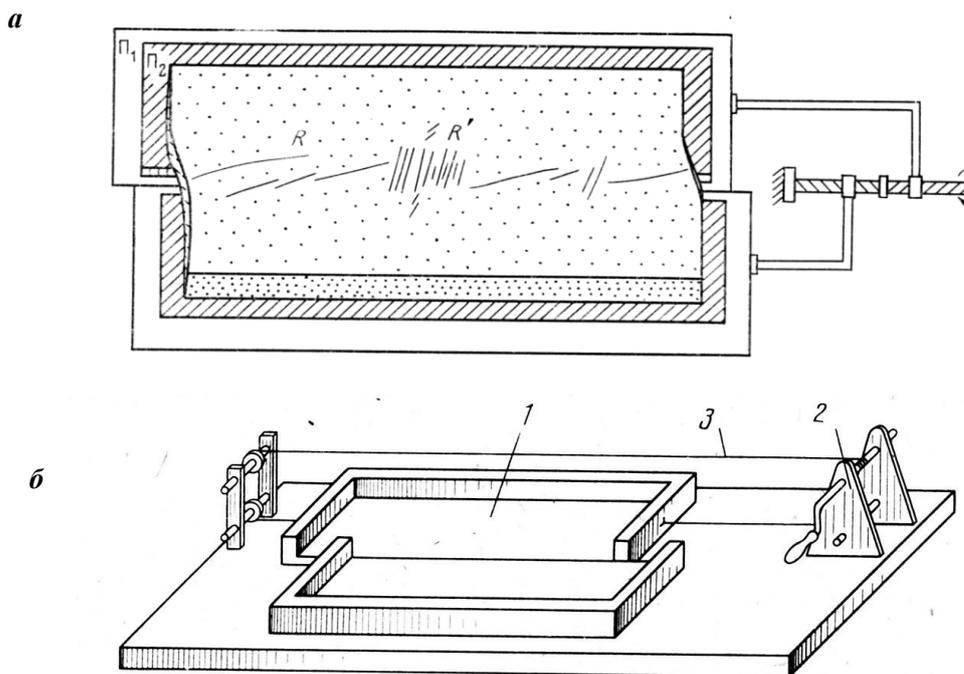


Рис. 12. Установки для создания нагружения простого сдвига в виде неоднородного по глубине сдвига: *а* – плоскими пластинами-подложками (С.Стоянова); *б* – с коробками-подложками, имеющими продольные и торцевые стенки

Модели Ж. Чаленко [Tchalenko, 1968] показали, что наряду с R -сколами в глинах формируются R' -сколы углы между которыми составляли $50\text{--}70^\circ$. Подобные углы определяют диапазон изменения коэффициента внутреннего трения от $0.36\text{--}0.84$. Выделенные R - и R' -сколы составляют с простираем зоны сдвига углы $15\text{--}30^\circ$ и $80\text{--}85^\circ$ (рис. 13, б). Эти данные характеризуют нагружение в виде чистого сдвига без дополнительного бокового (ортогонального оси сдвига) сжатия. Установлено, что первоначально вблизи оси сдвигов происходит зарождение трещин с поперечной системой R' -сколов, Вторая система трещин R -сколов – диагональная, характеризуется более поздним заложением. По мере развития сдвига эта система становится более выраженной, в то время как развитие R' -сколов затормаживается. При разрастании R -сколы искривлялись, изгибаясь в сторону оси сдвига. В экспериментах были получены трещины с простираем зеркально противоположным R -сколам. Эти трещины стали именовать P -сколами, предполагая, что ответственным за их формирование является напряжения сжатия. Этот тип сколов развивается после образования R - и R' -сколов, имеет несколько меньший линейный размер и располагается внутри соседних пар R -сколов. В других экспериментах P -сколы столь больших размеров не были получены. Появление этих сколов связано с дополнительным боковым обжатием модели, проводившимся в процессе эксперимента на глинах (см. рис. 13, б).

В моделях С. Стоянова R - и R' -сколы возникали практически одновременно и развивались примерно в равной степени. Большим длинам и амплитудам смещений R -сколов противопоставляется гораздо большее число нарушений R' . Вдоль зоны скалывания нередко наблюдается чередование участков, нарушенных либо с косыми R' -сколами и продольными L -сколами (см. схему рис. 9), либо квазипоперечными R -сколами. В процессе развития зоны скалывания R' -сколы срезаются косыми и продольными R - и L -сколами. В экспериментах системы R' - и R -сколов чередовались вдоль оси сдвига. В экспериментах С. Стоянова отрывы T получаются только после смачивания поверхности водой. При тонком смачивании отрывы T развиваются вблизи концов R' -сколов. L -сколы в виде мелких трещинок появлялись на ранней стадии. Крупные L - и P -сколы образуются значительно позднее и занимают подчиненное положение в совокупности структур. При сочетании сдвига с поперечным сжатием R' -сколы имеют заметную взбросовую составляющую. В условиях дополнительного поперечного растяжения преимущественное развитие получают сбросы.

В более поздних экспериментах С. Стоянова [1977] представлена гистограмма частоты появления трещин разного типа (рис. 14), согласно которой можно считать трещины с морфологией R - и R' -сколов наиболее типичными трещинами зон сдвига, а P -сколы являются структурами третьего ранга.

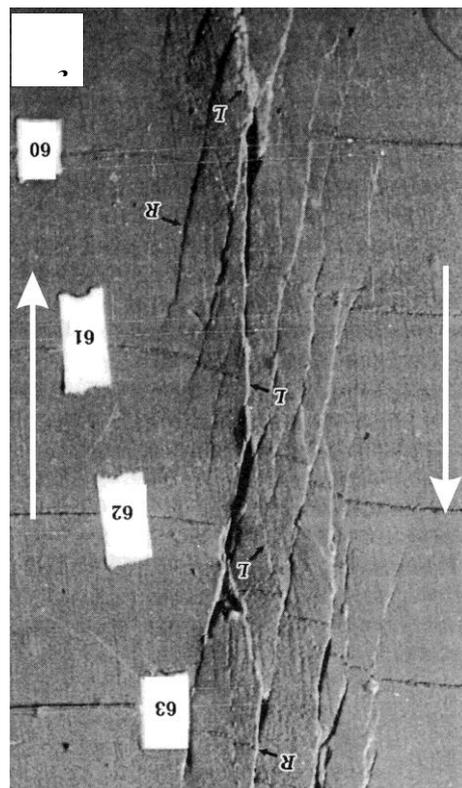
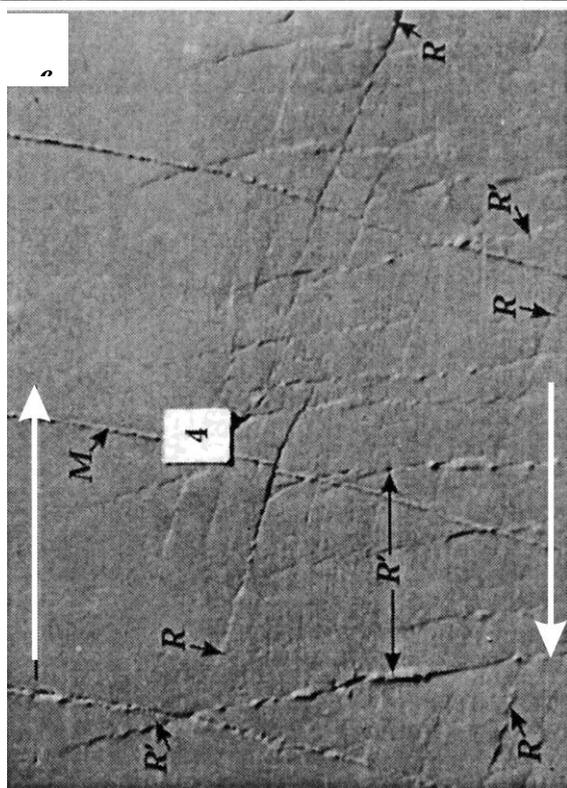
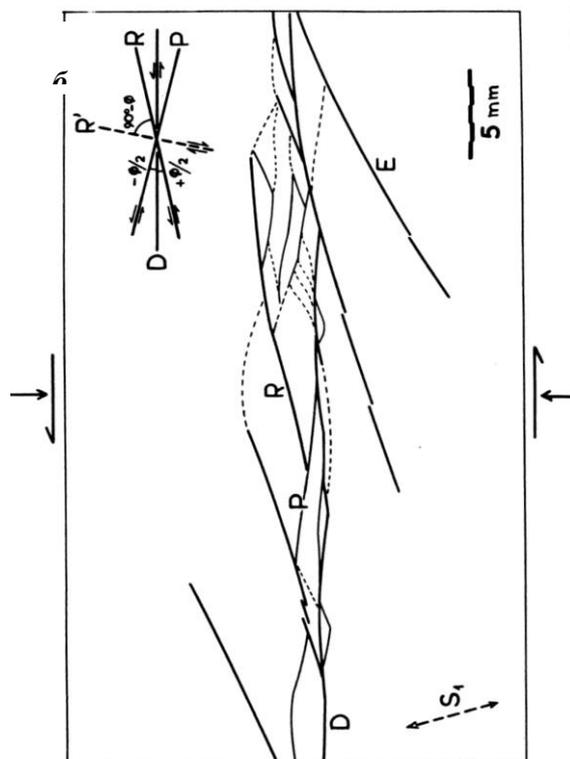
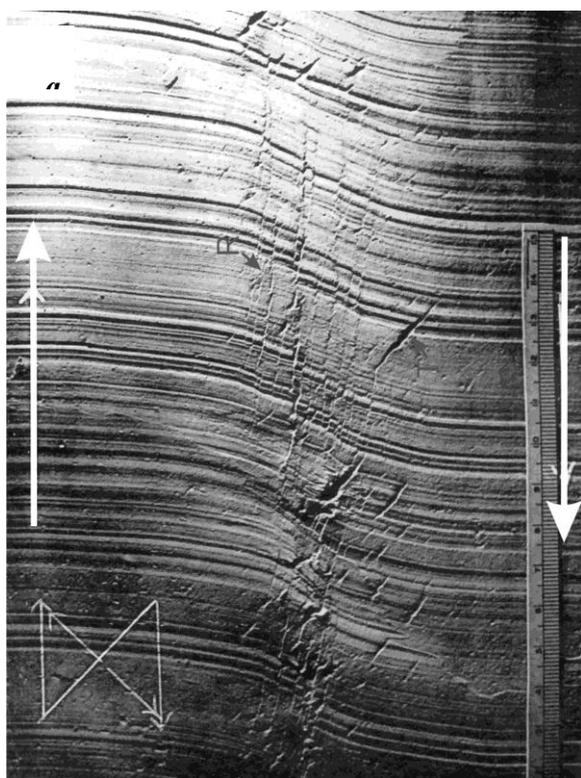


Рис. 13. Фото поверхности модели продольного сдвига слоя глины в экспериментах Э. Клооса [E.Cloos] (а), Ж. Чаленко [Tchalenko, 1968] (б), С.А. Борнякова [1981] (в) и В.Б. Кобылянского [Гинтов 2006] (г). Видны две системы трещин R - и R' -сколы и T -отрывы

В моделях С.А. Борнякова [1981] и К.Ж. Семинского [2003] подбор свойств глин и скорости нагружения определялся стремлением соблюдения условий подобия природного и модельного объектов. Заметим, что условия подобия по гравитационным – массовым силам здесь не соблюдались. По результатам моделирования

было показано, что весь процесс формирования сдвиговой зоны условно разделяется на две стадии. В первой, пликативной стадии на поверхности вдоль оси сдвига появляются небольшие складки. Оси складок составляют с простиранием сдвиговой зоны угол в $35\text{--}50^\circ$ [Борняков, 1981]. По мере увеличения относительного сме-

щения подложек, т.е. с развитием сдвига, угол этот уменьшается до $10\text{--}35^\circ$. В начале второй стадии вблизи оси сдвигов происходит зарождение трещин, причем первой появляется поперечная система R' -сколов, а уже затем косая R -сколов (рис. 13, в). Вторая система трещин – диагональная (R -сколы) характеризуется более поздним заложением. Простирание разрывов, ее образующих, составляет с простиранием сдвиговой зоны угол в $15\text{--}30^\circ$. Плоскость сместителя протяженных R -сколов пропеллерообразно изогнута с падением в сторону оси сдвига, но эта изогнутость менее выражена, чем для R' -сколов.

К.Ж. Семинским показано, что R' -сколы возникают в зоне скалывания одновременно с R -сколами, но короче их, имеют большую густоту и сравнительно рано теряют активность. R -сколы доминируют в структурообразовании и на завершающей стадии формируют сегменты будущего магистрального сместителя. Причиной прекращения развития R' -сколов является изменение интегральных свойств в процессе развития пластического течения (происходит увеличение угла скалывания при постоянной ориентации к оси сдвига главных напряжений). Этот эффект определяет изменения угла наклона R -сколов к оси сдвига в процессе эксперимента от 25° до нуля. Интенсивное развитие в начале упрочнения зоны скалывания системы R' -сколов, а к ее концу R -сколов является одним из факторов зональности внутреннего строения разломных зон.

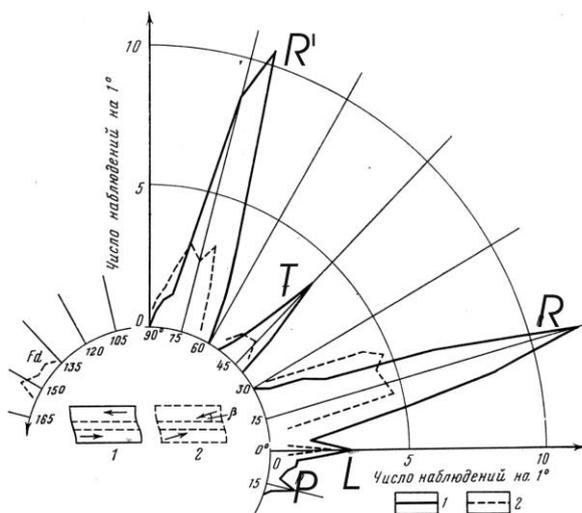


Рис. 14. Круговая гистограмма углов простирания и частоты встречаемости трещин различного генезиса в моделях продольного сдвига [Стоянов, 1977]

На более поздних стадиях первоначально прямые трещины приобретают S -образную форму. Вторая система R' -сколов характеризуется более поздним заложением, простирание трещин, ее образующих, составляет с простиранием сдвиговой зоны угол в $15\text{--}30^\circ$, который в про-

цессе сдвига уменьшается. Трещины обеих систем представляют собой трещины сдвига. В экспериментах показано, что отрывы в виде пулл-аппартов T формируются в моделях с очень вязкими глинами. P -сколы формируются в периферии участков повышенной плотности трещин, которые пятнами располагаются вдоль зоны скалывания (дифференциация зоны) и обеспечивают сопряжение друг с другом R -сколов. Они (P -сколы) часто имеют также и небольшую надвиговую компоненту смещения.

В моделях В.Б. Кобылянского на влажных глинах, проводившихся на приборе “Разлом” С.А. Борнякова, показано, что по мере увеличения относительного смещения подложек R -сколы, разрастаясь, соединяются одна с другой путем образования более пологих к оси сдвига сколов L -сколы (рис. 13, б). На завершающей стадии L -сколы образуют магистральный разрыв, перерезающий всю толщу слоя по вертикали. В начальный момент на поверхности модели формируется зона скалывания из R - и R' -сколов. В дальнейшем ширина зоны трещиноватости уменьшается особенно на стадии формирования L -сколов. При приложении дополнительного, поперечного к оси сдвига сжатия простирания R - и R' -сколов еще больше отворачиваются от оси сдвига. Уменьшения угла наклона трещин на более поздних стадиях деформирования О.Б. Гинтовым [2006] связывалось с изменением эффективных свойств материала. Он предположил, что на этих стадиях глины ведут себя как идеальное пластическое тело, для которого разрушение происходит по площадкам максимальных касательных напряжений (ось сдвига).

В моделях А.Н. Бокуна [1991] на первой стадии в практически однородном поле напряжений, возникшем от начального сдвига, формируется флексурный изгиб и появляется система параллельных трещин, ориентированных перпендикулярно простиранию основного сдвига (R' -сколы). Эти мелкие сдвиги имеют прямо-линейную или S -образную форму. В процессе дальнейшего горизонтального смещения эта система трещин поворачивается и принимает кулисообразное расположение. А.Н. Бокун считает, что эти сколы приповерхностными, так как в моделях они возникали не при любой толщине слоя.

В моделях А.В. Михайловой [2002] использовались методы количественной оценки деформаций, которые позволило восстановить поле скоростей деформаций в приповерхностной области слоя (рис. 15). Для этого использовалась сетка кружков, наносимая на поверхность моде-

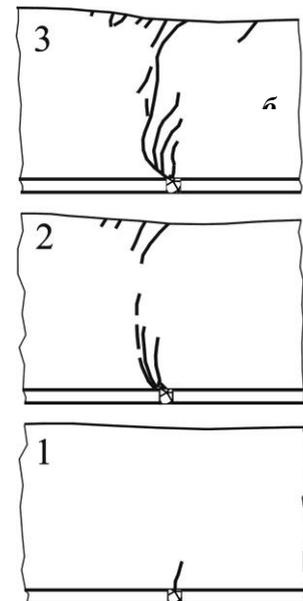
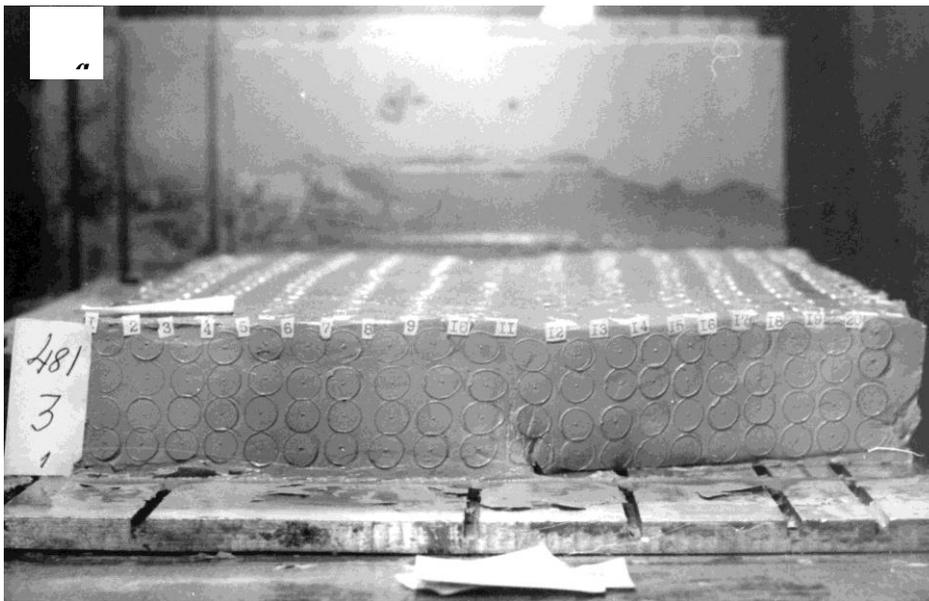


Рис. 15. Модель неоднородного по глубине простого сдвига в экспериментах А.В. Михайловой для двух последовательных стадий нагружения (а, б), боковой вид со стороны сдвигаемых пластин. Видны системы сколов, формирующиеся над границей контакта сдвигаемых подложек, некоторые из которых имеют сбросовую компоненту, и деформации кружков – меток

ли из влажной глины до начала нагружения [Михайлова, 1971, 1989]. Высокая частота нанесения кружков – меток позволяла выполнять детальное построение поля деформаций и следить за его изменениями в процессе нагружения. Данные о деформациях в плоскости модели дополнялись измерением изменений высоты в центрах кружков. Совместный анализ этих параметров позволял интегральным образом оценивать и все компоненты тензора приращений деформаций. Такие оценки показали, что степень деформации возрастает от периферийной зоны к центральной (оси сдвига), достигая там максимума значений. Характерным является неоднородность поля деформаций не только вкрест, но и параллельно оси сдвига.

В процессе сдвига деформации еще более локализируются, как бы стягиваясь и накапливаясь в центральной части сдвиговой зоны. В экспериментах А.В. Михайловой анализировалось деформированное состояние, возникающее на торцах модели поперек зоны сдвига (см. рис. 15, б). Результаты подобного анализа некорректно продолжать во внутренние области модели, однако он дает понимание характера локализации деформаций в глубине модели и позволяет говорить о местах концентрации напряжений и о зонах генерации разрушения. Установлено, что трещины первоначально начинают формироваться вблизи оси сдвига у подошвы модели. Затем, на более продвинутой стадии сдвига, они прорастают в верх и при этом начинает формироваться система трещин на поверхности модели. Дальнейшее развитие обе-

их систем трещин от подошвы и от поверхности приводит к их объединению в средней по глубине части модели.

Кинематика вторичных разрывов. В работах С.А. Борнякова [1981] уже на влажных глинах подтвержден факт наличия небольшого наклона плоскости трещины R -сколов в направлении против смещения подложек, наблюдавшийся в экспериментах [Парфенов, Жуковский, 1966], и показано, что эти сколы помимо сдвиговой имеют и вертикальную компоненту смещений (рис. 16, а). Плоскость трещин в месте пересечения с осью сдвиговой зоны принимает вертикальное падение, а в удалении падение выполаживается до углов $75-80^\circ$ с направлением погружения в сторону направления подложек. Подобная конфигурация трещин в разных бортах зоны сдвига определяет их общую пропеллеобразную изогнутость при переходе через ось сдвига. Характер вертикального смещения крыльев трещин характеризует R -сколы как сдвиги со взбросовой компонентой смещений, а R' -сколы как сдвиги со сбросовой компонентой смещений. Этот важный факт остался практически незамеченным другими экспериментаторами (отметим, что в работе [Парфенов, Жуковский, 1966] для моделей на конифоли также было замечена небольшая раздвиговая компонента для R -сколов, а их простирали отвечало углу $20-40^\circ$ к оси сдвига с падением навстречу общего смещения крыла зоны сдвига) и нашел свое подтверждение в результатах математического моделирования, приводимом нами далее.

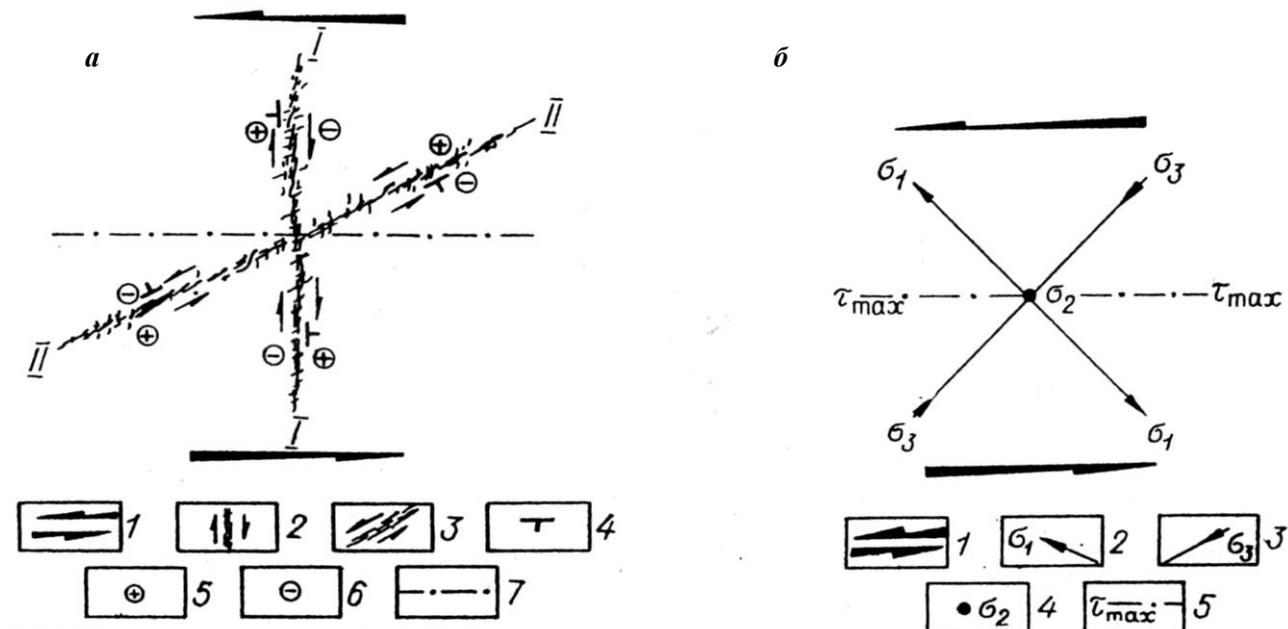


Рис. 16. Фото (а) и схема (б) разрушения поверхности модели влажной глины для неоднородного по глубине простого сдвига с системами R-сколов (II) и R²-сколов (I) по результатам экспериментов С.А. Борняков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СДВИГА

Постановка задачи. В работах [Ребецкого, 1987, 1988] было показано, что модель деформирования для нагружения, представленного на рис. 17, может быть асимптотически приближена бесконечным плоским слоем, лежащим в условиях полного сцепления (сцепление без возможности проскальзывания) на двух полубесконечных жестких блоках (основание модели), которые горизонтально смещаются вдоль плоской границы их контакта, содержащей в себе ось z . Верхняя поверхность слоя свободна от нагружения а на бесконечности напряжения вызванные сдвигом жестких блоков нулевые. В такой модели в плоскостях, ориентированных перпендикулярно оси z , характер напряженного состояния один и тот же, а смещения w происходят параллельно оси сдвига.

Таким образом, напряжения и смещения являются функцией только координат x , y и изменяются в плоскости xOy (двумерная задача). В условиях неограниченности слоя в горизонтальном направлении задаваемые вдоль подошвы слоя движения в направлении оси z формируют в нем смещения только в направлении этой оси, т.е. движения в направлении осей x и y можно считать нулевыми. Подобный тип смещений отвечает среде с линейной диаграммой нагружения (упругой, вязкой) и с линейной взаимосвязью между деформациями и смещениями Данная схема нагружения в природном объекте отвечает осадочному чехлу (бесконеч-

ный слой), лежащему на кристаллическом фундаменте земной коры (полубесконечные жесткие

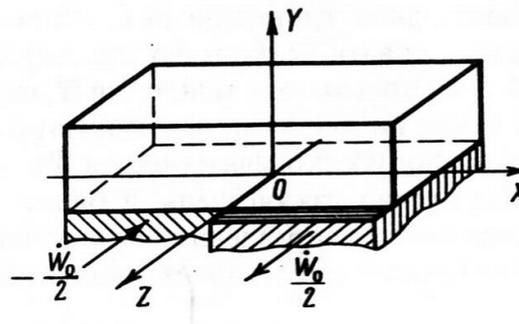


Рис. 17. Схема нагружения бесконечного в латеральном направлении плоского слоя, лежащего на двух полубесконечных жестких блоках при математическом моделировании

блоки), разделенных между собой разломом. В терминах механики состояние, отвечающее начальной стадии деформирования слоя (до формирования структур разрушения), блоки основания которого испытывают горизонтальные смещения, следует называть антиплоским деформированным состоянием. Для этого состояния в рамках схемы рис. 17 и выбранной системы координат ненулевыми являются только касательные напряжения σ_{xz} и σ_{yz} (если не учитывать влияние собственного веса материала модели и при отсутствии бокового обжатия или растяжения в направлении, перпендикулярном

осевой плоскости сдвига) все остальные компоненты тензора напряжений равны нулю. На схеме рис. 18 показаны плоскости, вдоль которых действуют эти касательные напряжения.

Заметим, что в отличие от задачи простого сдвига, представленного на рис. 6, а, двумерность задачи антиплоской деформации связана с поперечным сечением слоя (смещения не зависят от координаты z), а не с латеральными направлениями (смещения не зависят от вертикального направления – ось y на схеме рис. 17).

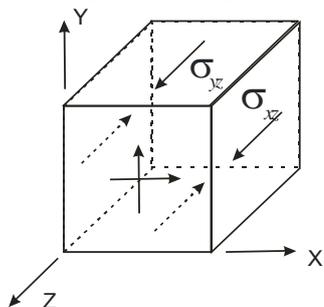


Рис. 18. Ненулевые напряжения на гранях параллелепипеда в слое при нагружении по схеме рис. 17

Деформированное состояние. В работах Ю.Л. Ребецкого [1987, 1988] показано, что для линейной упругой (вязкой) модели среды смещения вдоль оси z определяются выражением:

$$w = \frac{w_0}{\pi} \arctg \frac{sh(\pi x / 2H)}{\sin(\pi y / 2H)}, \quad (1)$$

где w_0 – относительная амплитуда смещения жестких пластин подложек (блоков фундамента), а H – мощность слоя.

На рис. 19 представлен в трехмерном виде характер горизонтальных смещений вдоль оси z линий, лежащих на разных глубинах (вдоль оси y) вертикального сечения, проведенного поперек оси сдвига (штрих пунктирные линии на подошве и поверхности модели). Как это хорошо видно, плоское вертикальное сечение приняло S-образную форму. Чем ближе к подошве слоя лежат маркирующие линии, тем более выражен изгиб линий вблизи оси сдвига.

На самой подошве слоя смещения в направлении оси z испытывают разрыв второго рода, т.е. изменяются скачком. Градиент смещений имеет максимум у подошвы вблизи границы контакта двух подложек при физическом моделировании и обусловлен сменой направления движения вдоль осевой плоскости сдвига. Компоненты тензора деформации сдвига определяются как градиент от вектора смещений в соответствующем направлении

$$\gamma_y = \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_x = \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (2)$$

Отсутствие (нулевое значение) в выбранной

системе координат деформаций изменения длины говорит о том, что в каждой точке слоя тензор напряжений отвечает чистому сдвигу. Поскольку компоненты тензора вращения равны по абсолютной величине значениям соответствующих компонент деформаций сдвига:

$$\omega_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad \omega_x = -\frac{\partial w}{\partial y}, \quad (3)$$

то это определяет действие в каждой точке слоя деформированного состояния простого сдвига [Ребецкий, 2007]. Полный вектор вращения ω определится как векторная сумма его компонент:

$$\omega_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad \omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}. \quad (4)$$

В поперечном сечении модели его величина изменяется так, что максимальные его значения достигаются у подошвы вблизи оси сдвига. Согласно (4) ось вектора вращения ω лежит в вертикальной плоскости xOy и его ориентация изменяет свое направление по мере удаления от оси сдвига и подошвы модели. На самой подошве модели он ориентирован параллельно оси y , а у поверхности и по всей глубине над блоками основания – параллельно оси x .

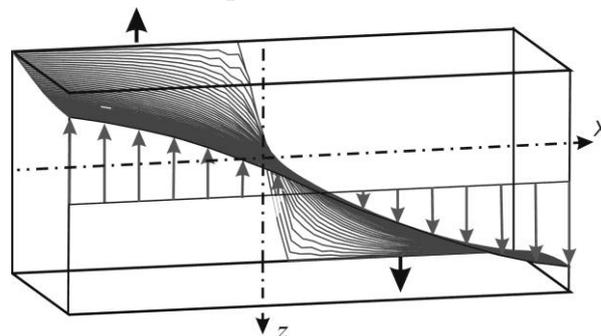


Рис. 19. Деформации плоскости вертикального сечения в модели неоднородного по глубине простого сдвига (аксонометрия, вид сверху)

Напряжения для антиплоского деформированного состояния. Напряженное состояние, обусловленное только движениями блоков основания, определяется значениями касательных напряжений σ_{xz} и σ_{yz} , которые для случая упругого слоя прямо зависят от значений соответствующих компонент деформаций сдвига (2):

$$\sigma_{xz} = \mu \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{w_0 \mu}{4H} \frac{\sin(\pi y / 2H) \operatorname{ch}(\pi x / 2H)}{\operatorname{ch}(\pi x / H) - \cos(\pi y / H)}, \quad (5)$$

$$\sigma_{yz} = \mu \frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{w_0 \mu}{4H} \frac{\cos(\pi y / 2H) \operatorname{sh}(\pi x / 2H)}{\operatorname{ch}(\pi x / H) - \cos(\pi y / H)},$$

где μ – модуль упругого сдвига.

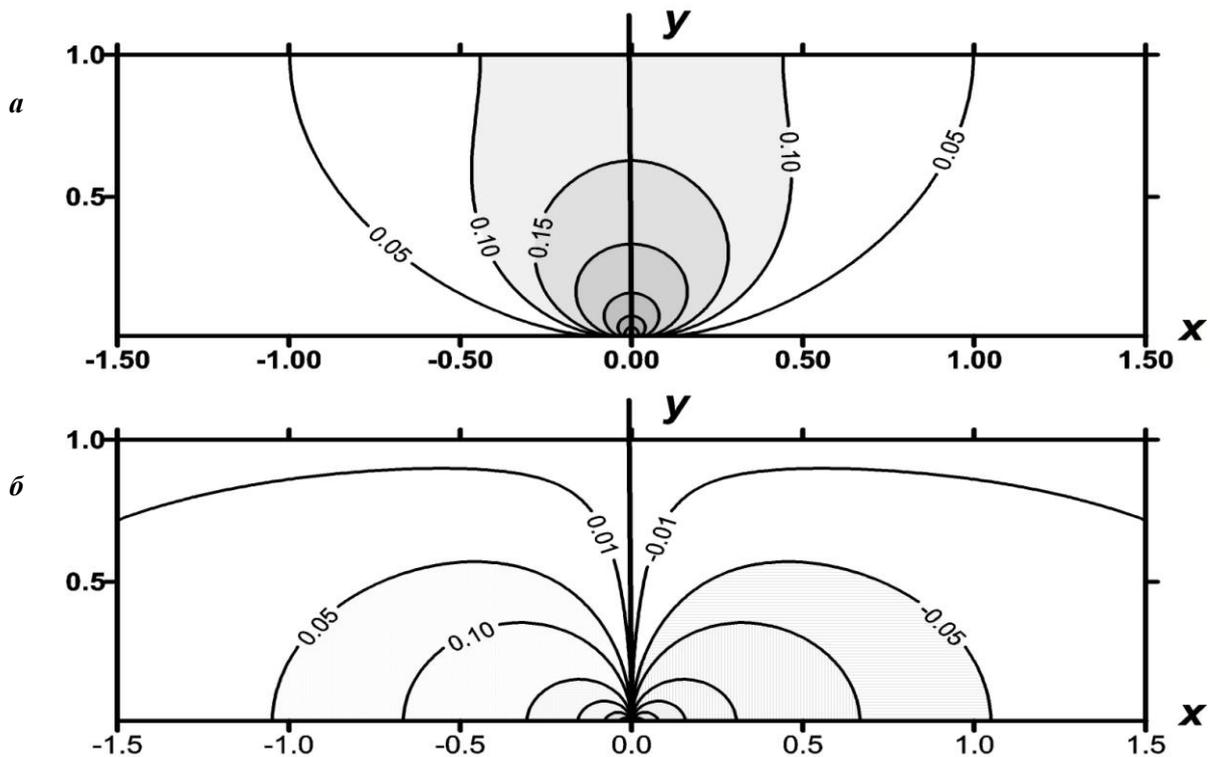


Рис. 20. Области разной интенсивности значений компонент касательных напряжений в модели неоднородного простого сдвига: $a - \sigma_{xz}$, $b - \sigma_{yz}$. Значения напряжений обезразмерены на $K = w_0 \mu / H$

На рис. 20 представлено распределение касательных напряжений σ_{xz} и σ_{yz} в поперечном сечении слоя. Абсолютный максимум значений этих напряжений соответствует точке $x = 0$, $y = 0$, т.е. выходу "разлома" блоков фундамента к подошве слоя. Некоторое отличие от сказанного для σ_{xz} (рис. 21, a) связано с малой плотностью точек расчета и процедурой сглаживания, используемой в стандартных программах построения изолиний. Антиплоскому деформированному состоянию без учета действия массовых сил отвечает тензор напряжений (деформаций) чистого сдвига $\mu_{\sigma}^{ss} = 0$ при нулевом значении всестороннего давления $p^{ss} = 0$. Значения максимальных касательных напряжений τ^{ss} , отвечающих также только этому состоянию, определяются выражением:

$$\begin{aligned} \tau^{ss} &= \sqrt{\sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2} = \\ &= w_0 \mu [ch(\pi x / H) - \cos(\pi y / H)]^{-0.5} / (4\sqrt{2}). \end{aligned} \quad (6)$$

Обратим внимание, что выражение (6) с точностью до константы равно выражению (4), определяющему амплитуду вектора вращения. На рис. 21 показаны области разной интенсивности значений максимальных касательных напряжений τ^{ss} , рассчитанные в соответствии с выражением (5). Максимум τ^{ss} находится у подошвы слоя вблизи границы контакта смещающихся подложек.

Важно отметить существование локального максимума меньшей интенсивности, расположенного вдоль оси сдвига на поверхности слоя.

Обратим внимание, что выражение (6) с точностью до константы равно выражению (4), определяющему амплитуду вектора вращения. На рис. 21 показаны области разной интенсивности значений максимальных касательных напряжений τ^{ss} , рассчитанные в соответствии с выражением (5). Максимум τ^{ss} находится у подошвы слоя вблизи границы контакта смещающихся подложек. Важно отметить существование локального максимума меньшей интенсивности, расположенного вдоль оси сдвига на поверхности слоя. Этот локальный максимум как раз и определяет появление трещин на поверхности моделей вслед за трещинами, развивающимися от подошвы (см. рис. 15, b). Принимая значения модуля сдвига $\mu = 40$ кбар, мощность слоя $H = 4$ км, амплитуду смещения $w_0 = 100$ м, находим значение $K = 1000$. В этом случае значения величин параметров для рис. 21, 22 представлены в килобарах.

Оси главных напряжений. В случае, когда массовые силы не создают девиаторных напряжений, подошва слоя вблизи его контакта с движущимися подложками является плоскостью действия максимальных касательных напряже-

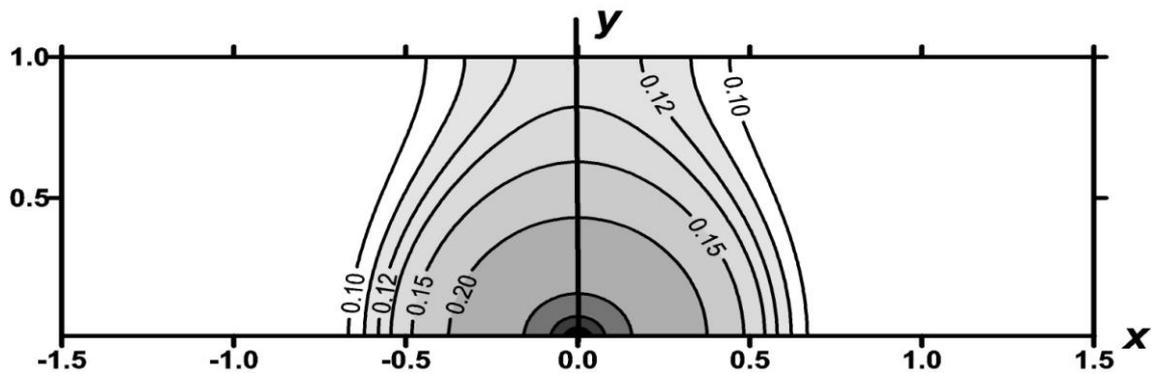


Рис. 21. Области разной интенсивности значений максимальных касательных напряжений в модели неоднородного простого сдвига. Значения напряжений обезразмерены на коэффициент $K = w_0\mu/H$

ний, которые здесь направлены вдоль оси сдвига: $\tau^{ss} = \sigma_{yz}$, $\sigma_{xz} = 0$. Это предопределяет ориентацию осей главных напряжений σ_1 и σ_3 под углом 45° к подошве фундамента, а оси σ_2 перпендикулярно осевой плоскости сдвига (параллельно оси x). Осевая плоскость сдвига также является плоскостью действия максимальных касательных напряжений, здесь: $\tau^{ss} = \sigma_{xz}$, $\sigma_{yz} = 0$. Вдоль этой плоскости оси главных напряжений σ_1 и σ_3 наклонены к ней под углом 45° , а σ_2 здесь имеет вертикальную ориентацию.

Ранее [Ребецкий, 1987, 1988] получены уравнения для построения траекторий главных напряжений. На рис. 22, а показана ориентация траекторий осей промежуточных главных напряжений σ_2 в вертикальном сечении, перпендикулярном оси сдвига. Оси σ_2 всегда лежат в плоскости xOy , фиксируя тем самым и возможные вариации двух других главных напряжений, а также положения площадок действия максимальных касательных напряжений. На рис. 22, а положение площадок действия максимальных касательных напряжений показано только на поверхности слоя.

Траектории осей алгебраически максимального и минимального главного напряжения показаны на рис. 22, б. Оси этих напряжений, выходя под 45° из подошвы слоя (точки D_1 и D_3 соответственно для осей напряжений σ_1 и σ_3) по мере подъема к поверхности слоя, разворачиваются в сторону осевой плоскости сдвига. Эту плоскость они пересекают под углом 45° к оси z на высоте (точка A_0), отвечающей расстоянию выхода оси главного напряжения их подошвы слоя от осевой плоскости сдвига. Чем дальше отстоят точки D_1 и D_3 от этой плоскости, тем ближе к поверхности слоя точка A_0 . После пересечения осевой плоскости траектории, закручиваясь, спускаются к подошве слоя, которую вновь пересекают под

углом 45° . На поверхности модели такой тип траекторий главных напряжений асимптотически дает линии под 45° секущих ось сдвига.

Представленный тип траекторий главных напряжений отвечает случаю, когда массовые силы, вызванные действием собственного веса материала модели, не приводят к появлению дополнительных девиаторных напряжений (вязкое течение влажных глин) и боковые стенки модели (вертикальные плоскости, параллельные оси z) свободны от нормальных напряжений. Наличие массовых сил должно приводить к появлению дополнительных девиаторных напряжений, что обязательно скажется на характере траекторий главных напряжений.

Ориентация вторичных сколов в задаче антиплоского сдвига. Данные об ориентации осей главных напряжений, представленные на рис. 22, вместе с известными следствиями теории Кулона – Мора, позволяют выполнить прогноз вторичных нарушений на поверхности и в глубине модели, если считать, что гравитационные силы не создают девиаторных напряжений (см. далее раздел «напряжения от массовых сил»). На рис. 23 на нижней полусфере показаны ориентации осей алгебраически минимального и максимального главных напряжений и прогнозируемые плоскости сколов вблизи оси сдвига на нескольких глубинных уровнях, полученные в результате расчетов, когда массовые силы не вызывают возникновения девиаторных напряжений (величина бокового отпора $q = 1$).

Наши расчеты опирались на упругое решение, однако оно, как показывает опыт, в основном и определяет структуры разрушения, формирующиеся на последующих стадиях деформирования. Исходя из этого на представленных ниже рисунках строились ориентации плоскостей скалывания. При подобных построениях коэффициент внутреннего трения полагался равным 0.6, что определяет отклонение плоскос-

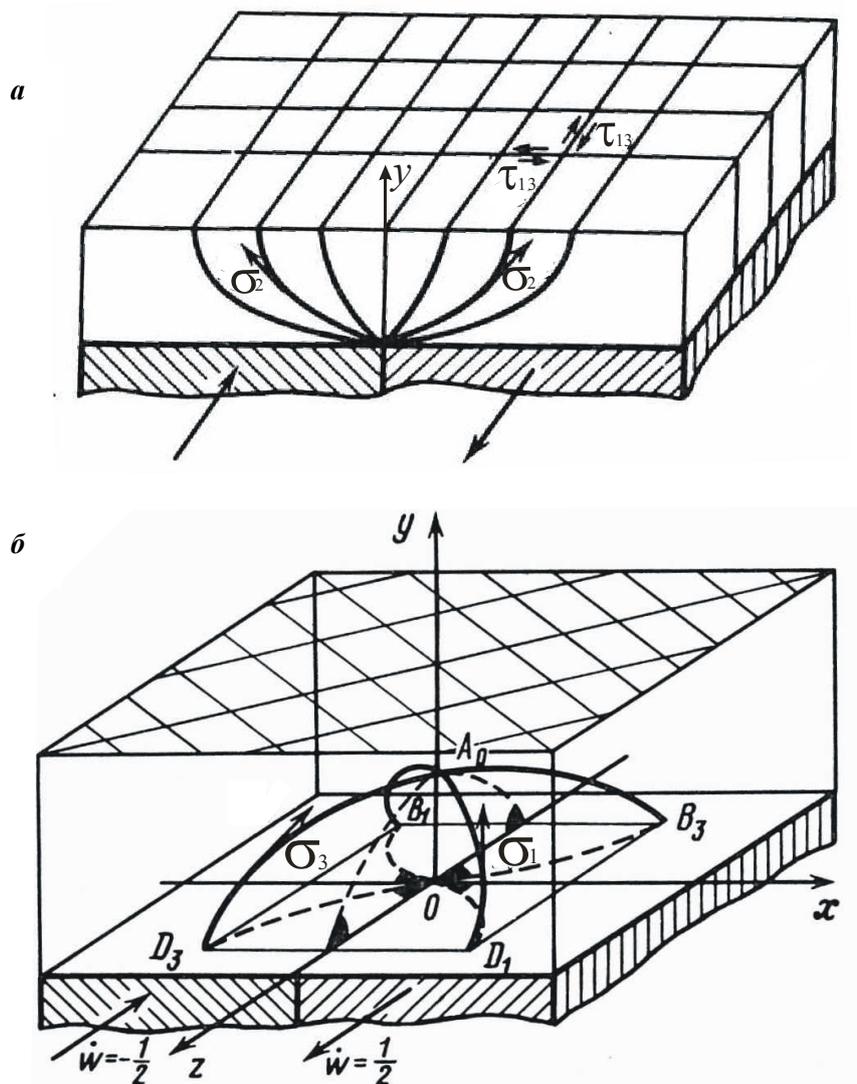


Рис. 22. Траектории осей главных напряжений для задачи антиплоского сдвига: *a* – траектории σ_2 в вертикальном сечении модели (на горизонтальной поверхности модели показана ориентация простираения плоскостей действия максимальных касательных напряжений). *б* – Траектории (сплошные линии) осей главных напряжений σ_1 и σ_3 внутри слоя (точки $D_i, B_i, i = 1, 3$ – точки входа и выхода осей из подошвы слоя, а точка A_0 – точка пересечения траекторий с осевой плоскостью сдвига)

тей скола от плоскостей максимальных касательных напряжений в сторону оси наибольшего сжатия на угол в 15.5° . Следует иметь в виду, что в реальности в зависимости от механических свойств конкретных материалов может реализоваться какая либо одна из систем сколовых трещин. Поскольку в осевой части слоя над «разломом фундамента» согласно рис. 23 имеет место тип напряженного состояния горизонтального сдвига, то расчеты, представленные ниже, выполнялись для точек, отстоящих от оси на небольшом расстоянии ($x = 0.1 H$).

Непосредственно вблизи поверхности модели (см. рис. 23, $y = 0.99 H$) оси главных напряжений σ_1 и σ_3 горизонтальны (длинные проекции осей), а оси промежуточного главного напряжения субвертикальны σ_2 , поэтому обе плоскости

скалывания вертикальны, и одна из плоскостей (R -сколов) составляет с осью сдвига более острый угол, чем другая (R' -сколов). Обе системы трещин представляют собой сдвиги. Трещины, развивающиеся вблизи поверхности, но на небольшом от нее удалении, уже не вертикальны. Вначале обе эти системы трещин имеют приблизительно одинаковую крутизну погружения. Затем с увеличением глубины (уменьшение y) их крутизна наклона начинает меняться, делая одну R -сколы более пологими. Погружение R -сколов для всего диапазона глубин направлено в сторону оси сдвига. Уже на небольших глубинах для этих сколов появляется дополнительная к сдвигу **сбросовая компонента** смещения. Эта компонента смещения возрастает с глубиной. Вблизи подошвы ($y = 0.01 H$) напряженное сос-

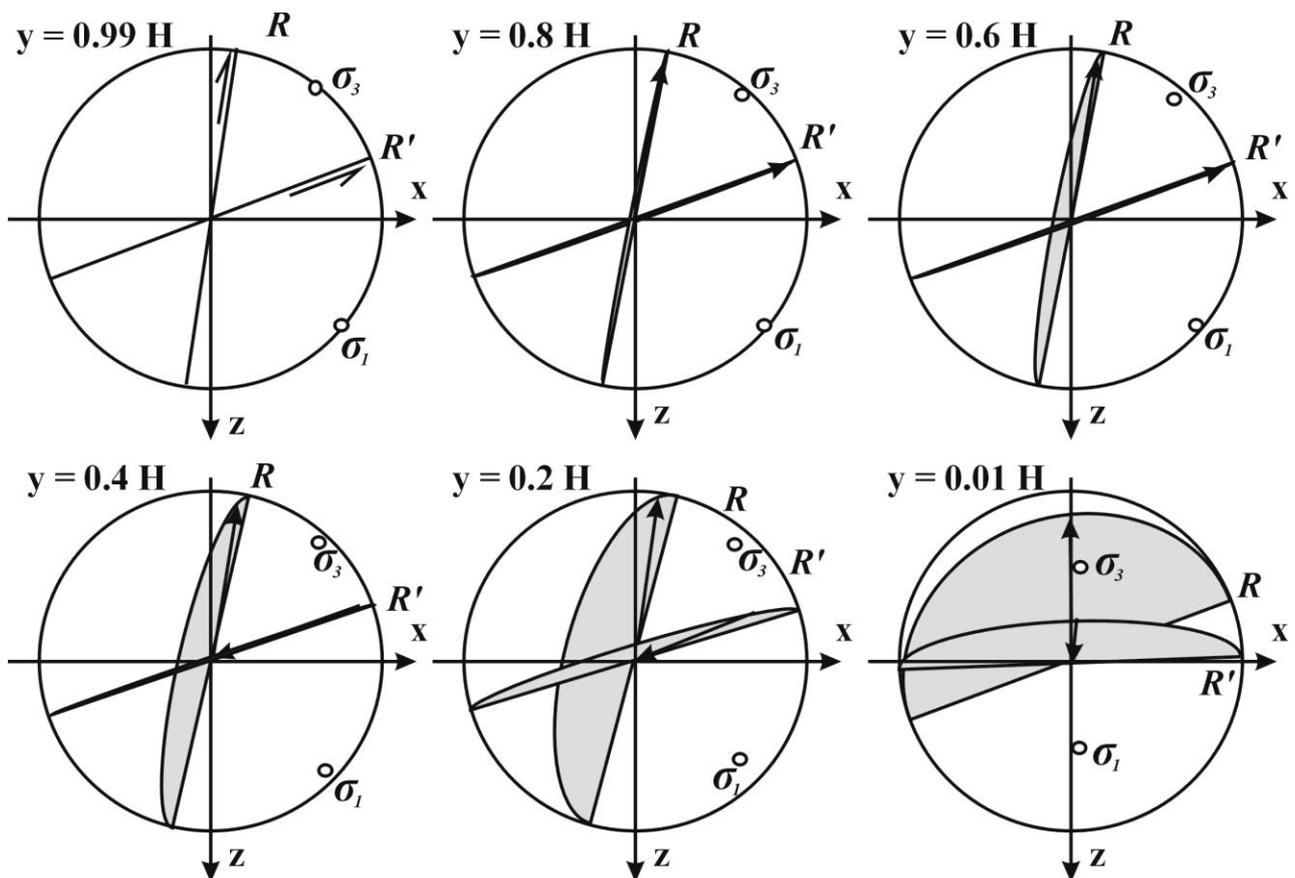


Рис. 23. Ориентация главных напряжений и площадок скалывания вблизи оси сдвига ($x = 0.1 H$) для разных глубин в проекциях на нижнюю полусферу

тояние отвечает взрывному типу, для которого оси главных напряжений σ_1 и σ_3 имеют погружение 45° и лежат в вертикальной плоскости, параллельной оси сдвига (см. рис. 23). Здесь плоскость прогнозируемых R -сколов очень пологая (менее 20°), а кинематика – сбросо-сдвиг.

Прогноз для R' -сколов определяет, что для всего диапазона глубин сохраняют субортогональное положение к простиранию от оси сдвига. Плоскость этих сколов в средней по глубине части слоя уменьшает крутизну своего погружения, здесь появляется дополнительная к сдвигу **взбросовая компонента** смещения, которая с глубиной растет. На подошве эти трещины становятся круто погруженными взбросами. Крутое погружение этой системы сколов направлено в сторону, противоположную движению подложек основания.

По мере удаления от оси сдвига для обеих систем трещин наблюдается разворот их простирания в сторону оси сдвига (уменьшается угол их простирания по отношению к оси сдвига). Подобная трансформация параметров структур разрушения обусловлена изменением ориентации осей главных напряжений (см. рис. 22, б). Разворачивание простирания трещин и изменение их погружения с глубиной совместно приводят к тому, что R -сколы обоих крыльев сдвига в сово-

купности образуют систему трещины пропеллерообразной формы. Непосредственно вдоль оси сдвига напряженное состояние всюду (на разных глубинах) сохраняется в том же виде, что и у поверхности модели, т.е. здесь сдвиговый режим напряженного состояния (см. рис. 22, б). Таким образом, характер напряженного состояния в моделях антиплоского простого сдвига диктует сложный тип структур разрушения, формирующихся в объеме модели.

Отметим, что полученный по результатам анализа морфологии разрывов, формирующихся вблизи поверхности, тип вертикальных смещений бортов R - и R' -сколов в виде небольшой соответственно сбросовой и взбросовой компоненты совпадает с результатами наблюдений в экспериментах на влажных глинах (см. рис. 16, а). Для глубинных участков слоя полученная морфология трещин следует рассматриваться как прогнозная. Наиболее вероятно, что вблизи подошвы слоя в природном объекте развивается только одна из систем сколов – R -сколы.

Напряженное состояние от массовых сил. Выше мы считали, что массовые силы приводят к формированию одинаковых по величине сжимающих напряжений, действующих во всех на-

правлениях. В этом случае девиаторных напряжений нет и следовательно дополнительные напряжения не могут привести к изменению морфологии структур разрушения, исследованную выше для напряженного состояния только от антиплоского сдвига. Далее нами будет рассмотрен случай, когда действие массовых сил приводит к возникновению девиаторных напряжений. Уровень этих девиаторных напряжений может быть невысок (первые сотни бар), однако его достаточно, чтобы внести существенные изменения в ориентации осей главных напряжений и повлиять на морфологию формирующихся структур разрушения. На самом деле подобное состояние, когда массовые силы приводят к возникновению девиаторных напряжений, более соответствует состоянию горных пород [Ребецкий, 2008] консолидированной коры, чем состояние в котором действует только равномерное во все стороны давление.

В системе координат рис. 17 напряжения, связанные с массовыми силами (гравитационное напряженное состояние), запишутся в следующем виде [Динник, 1926; Крупенников и др., 1972]:

$$\sigma_{yy} = -\rho g(H - y), \quad (7)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = -q\gamma(H - y),$$

где ρg – удельный вес материала слоя (плотность, умноженная на ускорение силы тяжести), а $q \leq 1$ – коэффициент, определяющий степень развития пластических или катакластических (трещинных) деформаций. В случае чисто упругого состояния [Jaeger, 1962]

$$q = \nu / (1 - \nu), \quad (8)$$

а для стадии пластического (катакластического) течения, выравнивающего все нормальные напряжения $q = 1$. В области упруго-пластического течения коэффициент q может изменяться с глубиной.

Согласно выражениям (7) тензор напряжений только гравитационного состояния отвечает одноосному сжатию $\mu_{\sigma}^g = +1$ при значениях максимальных касательных напряжений и всестороннего давления, определяемых из выражений:

$$\tau^g = 0.5 (1 - q) \gamma (H - y), \quad (9)$$

$$p^g = (1 + 2q) \gamma (H - y) / 3.$$

Следует иметь ввиду, что граница перехода от чисто упругого к упруго-пластическому со-

стоянию может проходить на некоторой глубине от поверхности слоя (H_p). Ее положение зависит от выполнения предельного соотношения, в качестве которого можно принять критерий Друккера – Прагера, который для одноосного сжатия может быть представлен в виде:

$$2\tau / \sqrt{3} \leq [\tau_f + k_f (p - p_{fl})]. \quad (10)$$

Здесь τ_f и k_f – соответственно внутреннее сцепление и коэффициент внутреннего трения, p_{fl} – флюидное давление, уменьшающее силы трения на хрупком разрыве. Заметим, что определение флюидного давления в природном объекте достаточно большая проблема. В первом приближения для горного массива, не имеющего ярко выраженных локальных неоднородностей развития деформаций (разломов), его значение можно принимать равным весу столба жидкости на данной глубине, т.е. считать распределенным по глубине по гидростатическому закону:

$$p_{fl} = \rho_{fl} g (H - y). \quad (11)$$

Здесь $\rho_{fl} g$ – удельный вес флюида.

Гравитационное напряженное состояние присутствует в горных породах всегда, следовательно оно имело место и до начала движений блоков кристаллического фундамента. Рассчитаем гравитационные напряжения в предположении, что на этой стадии до начала движения блоков кристаллического фундамента распределение флюидного давления по глубине соответствовало выражению (11). Полагаем мощность осадочного чехла $H = 5$ км, удельный вес пород $\rho g = 2.7$ Г/см³, коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$, а параметры прочности $\tau_f = 25$ кГ/см² и $k_f = 0.6$ В этом случае согласно работе [Ребецкий, 2008] $H_p = 0.34$ км и значение для пород слоя ниже этой глубины коэффициент q изменяется по линейному закону от 0.33 ($y = H - H_p$) до 0.584 (подошва слоя $y = 0$). На рис. 24 приведены графики изменения максимальных касательных напряжений τ^g и всестороннего давления p^g , из которых видно, что в области упруго-пластического деформирования закон изменения этих параметров напряжений носит нелинейный характер.

Суммарное напряженное состояние. После начала движения блоков основания (кристаллического фундамента) в слое появляются дополнительные напряжения (5), которые накладываются на действовавшие до них напряжения,

вызванные действием массовых сил. В системе координат рис. 17 суммарное напряженное состояние будет складываться их касательных напряжений σ_{xz} , σ_{yz} , вызванных горизонтальными движениями блоков основания модели, и σ_{yy} , $\sigma_{xx} = \sigma_{zz}$, обусловленных массовыми силами. Это напряженное состояние сочетает в себе два состояния: одномерное – гравитационное (изменение параметров происходит вдоль оси y) и двумерное – антиплоское (компоненты тензора напряжений не зависят от координаты z). Поскольку первое напряженное состояние является состоянием одноосного сжатия, а второе – чистого сдвига то суммарное напряженное состояние будет являться промежуточными между этими двумя.

Используя полученные выше выражения представим простой способ оценки величин τ и μ_σ этого суммарного состояния. Этот способ опирается на отсутствие необходимости суммировать ненулевые компоненты тензора напряжений двух состояний, слагающих суммарное (в выбранной системе координат там, где у одного из состояний компоненты тензора не нулевые – у другого нулевые). Второй и третий инварианты тензора суммарного состояния могут быть записаны в следующем виде [Ребецкий, 2007]:

$$\tau^2 \left(1 + \mu_\sigma^2 / 3\right) = \left[\begin{array}{l} (\tau^{ss})^2 \left(1 + (\mu_\sigma^{ss})^2 / 3\right) + \\ + (\tau^g)^2 \left(1 + (\mu_\sigma^g)^2 / 3\right) \end{array} \right], \quad (12)$$

$$\tau^3 \mu_\sigma \left(1 - \mu_\sigma^2 / 9\right) = \left[\begin{array}{l} (\tau^{ss})^3 \mu_\sigma^{ss} \left(1 - (\mu_\sigma^{ss})^2 / 9\right) + \\ + (\tau^g)^3 \mu_\sigma^g \left(1 - (\mu_\sigma^g)^2 / 9\right) \end{array} \right].$$

Здесь верхний индекс для максимальных касательных напряжений и коэффициента Лоде – Надаи определяет состояние антиплоской деформации (ss) и гравитационное напряженное состояние (g). Полагая в этих выражениях $\mu_\sigma^{ss} = 0$ и $\mu_\sigma^g = +1$, а также проведя преобразования, получим нелинейные уравнения для определения μ_σ и τ :

$$\frac{(3 + \mu_\sigma^2)^3}{\mu_\sigma^2 (9 - \mu_\sigma^2)^2} = \kappa, \quad \kappa = \left[1 + 0.75 \left(\tau^{ss} / \tau^g \right)^2 \right]^3, \quad (13)$$

$$\left(\frac{\tau}{\tau^g} \right)^3 = - \frac{8}{(9 - \mu_\sigma^2) \mu_\sigma}.$$

На рис. 25 показан график функций $\kappa(\mu_\sigma)$ и

τ / τ^g , представленных в выражениях (15) для диапазона μ_σ от -1 до 0. Максимальные касательные напряжения τ суммарного напряженного состояния при μ_σ , стремящемся к -1, приближается к значению τ^g , а при μ_σ , стремящемся к нулю, приближается к значению τ^{ss} .

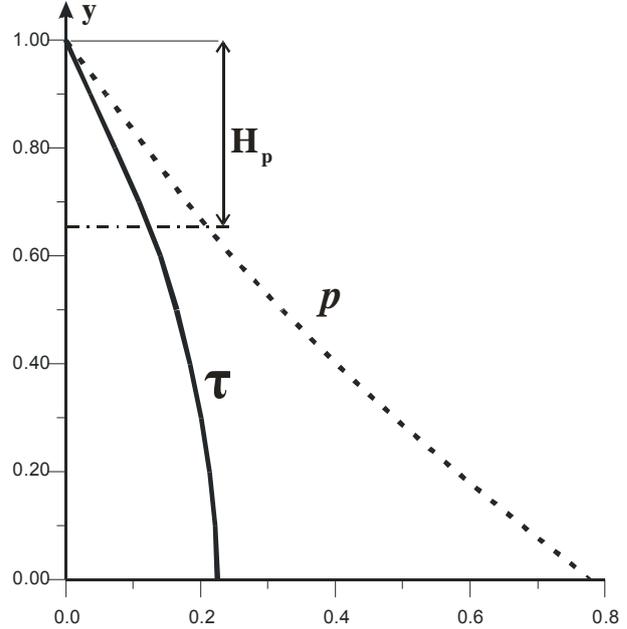


Рис. 24. Изменение по глубине слоя касательных напряжений и всестороннего давления для гравитационного напряженного состояния. Горизонтальная штрих-пунктирная линия указывает глубину смены упруго на упруго-пластического состояния

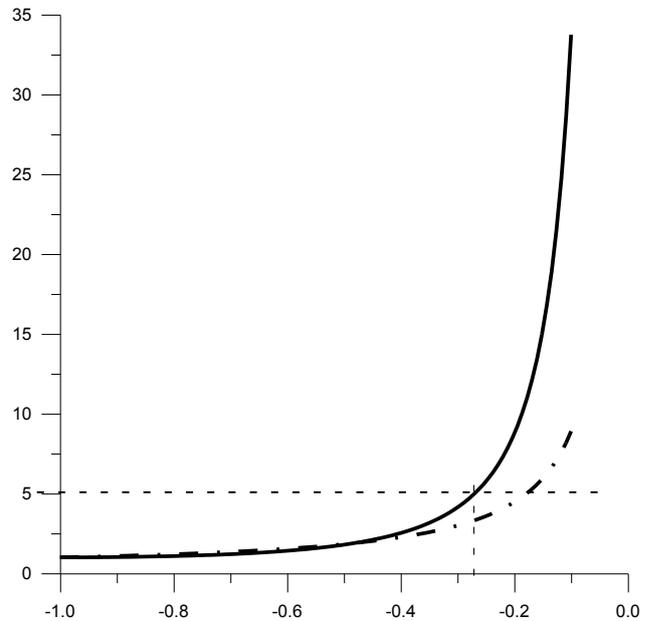


Рис. 25. Изменение коэффициента κ (сплошная кривая) и отношения $(\tau / \tau^g)^3$ (штрих-пунктирная кривая) как функции от μ_σ . Тонким пунктиром отмечено значение μ_σ для коэффициента κ , равного 5

Расчет коэффициента κ в поперечном сече-

нии модели для механических параметров, представленных выше ($K = 1$), дает возможность оценить распределение в слое значений коэффициента Лоде – Надаи μ_σ суммарного напряженного состояния (рис. 26, *a*). Видно, что в нижней части слоя вблизи выхода к его подошве разлома фундамента и у поверхности слоя до глубин 0.2 Н значение μ_σ практически равны нулю. Подобное распределение согласно второму выражению (15) и данным рис. 26 определяет близость в этих участках компонент девиаторных напряжений к тензору напряжений, определяемому в задаче антиплоской деформации, т.е. выражениями (5).

В средней части слоя над разломом фундамента значение μ_σ приближается к -0.25. Здесь можно считать, что параметры тензора напряжений в значительно большей степени определяют движения блоков фундамента.

По мере удаления в латеральном направле-

нии от срединной части слоя значения начинают достаточно быстро изменяться и уже на половине мощности становятся близкими к -0.6. Здесь влияние на тензор напряжений Суммарного состояния оказывают оба типа воздействия: сдвиг блоков основания и массовые силы.

Подобный же расчет коэффициента κ в поперечном сечении модели для механических параметров, дающих значение коэффициента $K = 0.2$ дает несколько иное распределение значений коэффициента Лоде – Надаи μ_σ суммарного напряженного состояния (рис. 26, *b*). Здесь уже только непосредственно вблизи контакта блоков основания значения μ_σ близки к нулю и следовательно на этом участке компоненты девиаторных напряжений близки напряжениям, определяемым задачей антиплоской деформации. На глубине от поверхности модели менее 0.1 Н непосредственно над контактом блоков основания значения μ_σ приближаются к -0.4

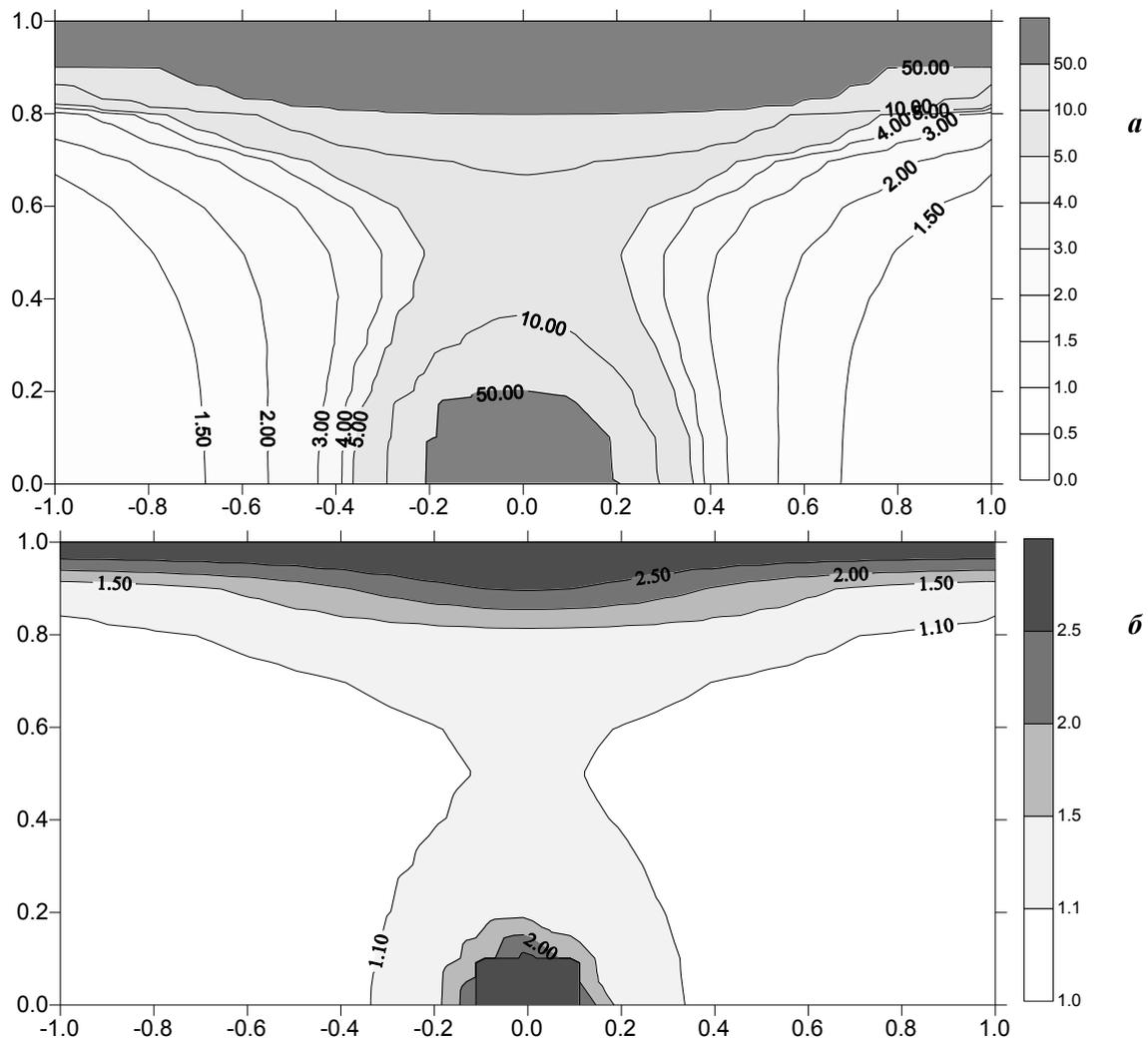


Рис. 26. Зависимость значений коэффициента Лоде – Надаи μ_σ суммарного напряженного состояния в поперечном сечении модели для значений коэффициента $K = 1$ (*a*), $K = 0.2$ (*b*) (расчеты выполнены по грубой сетке, что определило неровность изолиний)

(совместное действие двух напряженных состояний) и далее по мере приближения к поверхности они уменьшаются до нуля, что говорит о близости у поверхности напряжений к значениям напряжений, определяемым движениями блоков фундамента. Во всех остальных частях слоя значения μ_σ менее -0.7. Здесь также можно считать, что параметры тензора напряжений в значительно большей степени определяются гравитационными силами.

Представленные результаты фактически отражают более быстрое уменьшение влияния на суммарное напряженное состояние гравитационных сил по мере приближения к поверхности и резкое усиление вклада в напряженное состояние

движения блоков при приближении к "разлому". Срединная часть модели область наибольшего суммарного влияния обоих типов воздействия, при уменьшении амплитуд смещений блоков основания здесь может возобладать напряжения от гравитационных сил. Следствием этого будет появление трещин в приповерхностной части слоя и непосредственно вблизи границы контакта блоков основания.

В средней части слоя предел прочности не будет преодолен. Выполненный нами анализ на основе данных математического моделирования показал существенную роль массовых сил на картину распределения напряжений в объеме модели.

О ВЫПОЛНЕНИИ УСЛОВИЙ ПОДОБИЯ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ МАССОВЫХ СИЛ ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

При физическом моделировании структур разрушения во влажных глинах в обычных комнатных условиях без искусственного увеличения ускорения свободного падения роль массовых сил занижена из-за невыполнения условий подобия. Рассмотрим более подробно данное утверждение.

Очевидно, что в лабораторных моделях общим случаем нагружения является наличие двух одновременно приложенных типов воздействия: внешнего, распределенного по границе модели, и внутреннего, распределенного по объему. Внешнее воздействие определяется приложением к участку внешней границы модели распределенных сил или заданием перемещения (скорости перемещения) участка границы. Внутреннее воздействие, распределенное по объему модели, есть результат действия сил гравитации. Здесь мы не будем рассматривать модели природных процессов, в которых распределенные по объему силы могут быть связаны с неоднородным температурным полем, флюидным давлением трещинно-порового пространства и другими физическими процессами.

Имея ввиду действие в модели двух типов нагружения внешнего и внутреннего в виде массовых сил, из уравнений равновесия для импульса сил, действующих в вертикальном направлении, находим, что коэффициенты подобия при физическом моделировании должны быть связаны следующим соотношением:

$$C_\tau = C_g C_\rho C_L, \quad (14)$$

где $C_\rho \approx 1$ – коэффициент подобия по плотности, $C_L = 10^{-5}$ – коэффициент подобия по линейным размерам (мощность модели – первые сантимет-

ры, природы – первые километры), C_τ коэффициент подобия по напряжениям. Значение этого последнего коэффициента фактически определяет значение коэффициента по ускорению свободного падения C_g . В зависимости от цели эксперимента значение C_τ для вязких влажных глин следует определить на основании одного из двух подходов.

Оценка коэффициентов подобия в моделях течения. Когда в эксперименте требуется получить деформационные структуры, формирующиеся в природе за длительные времена нагружения, критерием подобия выступает само тектоническое течение. Считая, что в природе и в модели характер взаимосвязи напряжений и скорости деформаций определяется законом вязкого течения

$$\tau = \eta \dot{\epsilon}, \quad (15)$$

получаем дополнительное соотношение для коэффициентов подобия, которое будет иметь следующий вид:

$$C_\tau = C_\eta / C_t. \quad (16)$$

Подставив в (16) $C_\eta = 10^{-14}$ (вязкость влажной глины – 10^7 Пз (10^6 Па с) для скорости деформирования 10^{-3} сек⁻¹ [Михайлова, Осокина, 1973], а пород осадочного чехла 10^{21} Пз для скорости деформирования 10^{-12} сек⁻¹) и $C_t = 10^{-9}$ (время эксперимента сутки, в природе – миллионы лет), находим $C_\tau \approx 10^{-5}$ ($C_v = C_L / C_t = 10^4$ – коэффициент подобия по скорости нагружения). Используя это значение коэффициента подобия по напряжениям и ранее приведенные значения

других коэффициентов, из выражения (14) находим, что коэффициент подобия по ускорению свободного падения близок к единице. Подобное значение коэффициента подобия для ускорения свободного падения позволяет осуществлять тектонофизическое моделирование в обычных условиях без применения центрифугирования.

Приближение значения коэффициента C_g к единице при значении коэффициента C_η , отличным от выше представленного значения 10^{-14} , достигается изменением скорости нагружения и длительностью эксперимента. Для менее вязкой глины ($C_\eta < 10^{-14}$) необходимо уменьшать время эксперимента ($C_t < 10^{-9}$) при одновременном увеличении скорости нагружения ($C_v > 10^4$), а для более вязкой ($C_\eta > 10^{-14}$) – увеличивать время эксперимента ($C_t > 10^{-9}$) и уменьшать скорость нагружения ($C_v < 10^4$).

Если подобных изменений со скоростью нагружения не предпринять, то в первом случае, например при $C_\eta = 10^{-15}$, коэффициент подобия по ускорению свободного падения будет равен $C_g \approx 0.1$, что говорит о том, что при проведении эксперимента в обычных комнатных условиях роль силы тяжести на деформационный процесс будет завышена. Заметим также, что в этом случае вклад в общее напряженно-деформированное состояние модели внешнего нагружения занижается за счет уменьшенного на порядок значения скорости ($C_v = 10^4$), чем это требуется при выполнении всех условий подобия ($C_v = 10^5$). Для выполнения условия подобия модель необходимо поднять на высоту нескольких десятков километров, туда, где ускорение свободного падения на порядок меньше.

Во втором случае, например при $C_\eta = 10^{-13}$, коэффициент подобия по ускорению свободного падения будет равен $C_g \approx 10$ и тогда при проведении эксперимента в обычных комнатных условиях роль силы тяжести на деформационный процесс будет занижена, а роль внешнего нагружения наоборот завышена на порядок. В приведенном примере литостатическое давление, создаваемое массовыми силами в модели будет в десять раз меньше, чем это следует из анализа природного объекта. Для выполнения условий подобия такую модель необходимо поместить в центрифугу. Однако имея ввиду ее стандартные размеры – десятки сантиметров, подобное устройство будет очень дорого стоить.

Следует заметить, что завышение роли силы тяжести, рассмотренное в первом примере, явление достаточно экзотическое в реальных экспериментах. Как правило, роль силы тяжести занижается.

Следствие невыполнения подобия по массовым силам. Говоря о необходимости выполнения условия подобия по вязкости для слоисто неоднородных природных объектов мы понимаем, что в модели необходимо выдержать соотношения вязкости между отдельными слоями при обязательном выполнении условия $C_g \approx 1$. Что произойдет, если в при моделировании длительных процессов деформирования не будет выполнено условие $C_g \approx 1$? В случае, когда в исходной для эксперимента модели нет крупных внутренних неоднородностей плотности или больших изменений высоты поверхности модели, подобие деформирования будет соблюдено все равно, если в процессе деформирования рельеф поверхности модели будет оставаться практически плоским. Именно таким условиям отвечает моделирование зон горизонтального сдвига.

При моделировании деформаций осадочного чехла, вызываемом активными разломами кристаллического фундамента со взбросовой или сбросовой компонентой движения, в физической модели формируется ярко выраженное поднятое и опущенное крылья и, следовательно, для таких моделей важно соблюдение требования близости к единице значения коэффициента ускорения свободного падения. Занижение вклада в деформационный процесс массовых сил в таких моделях скажется по всей глубине модели. В верхних ее частях будет искажена реальная форма рельефа, а в средней и особенно в нижней частях модели вблизи активных разломов будут возникать области всестороннего растяжения, которые в реальном природном объекте могли полностью компенсироваться литостатическим давлением. Таким образом, прогнозируемые типы деформационных и разрывных структур из таких моделей будут далеки от развивающихся в природном объекте.

Следует иметь ввиду, что при моделировании тектонического течения массивов горных пород под нагрузкой количественному исследованию подлежат деформации с масштабом осреднения большими чем размер наиболее представительных структур разрушения в модели, складчатые формы и общие (изгибные) деформации поверхности. Структуры разрушения в таких моделях характеризуют участки, первыми достигающими предельного состояния. Уровень

предельных напряжений в модели при этом может не отвечать уровню природных напряжений (пересчет следует делать учетом условия подобия по C_τ), т.к. при подборе материалов в экспериментах невозможно одновременно выдержать условие подобия по вязкости (C_η) и по пределу текучести.

Отметим, что модели идеально вязкого (пластического) тела определяют отсутствие прямого генерирования массовыми силами на девиаторные напряжения из-за значения коэффициента Пуассона меньшего, чем 0.5 [Jaeger, 1962]. В рамках такой модели $q = 1$ в выражениях (7). Поскольку в моделях с длительным этапом нагружения основные деформации являются остаточными (пластическими), то не учет упругих деформаций является допустимым. Фактически представленные выше критерии подобия определяют необходимые условия для выдерживания соотношения между литостатическим давлением в природном объекте и в модели и между литостатическим давлением и девиаторными напряжениями, создаваемыми внешним нагружением.

Оценка коэффициентов подобия в моделях хрупкого разрушения. Если эксперимент нацелен на воспроизведение не просто мест появления природных разрывных нарушений, но и на анализ их морфологии (ориентации простирания, угла погружения, вектора относительного движения крыльев трещин), то C_τ следует оценивать из условия подобия предела хрупкой прочности или предела текучести

$$C_\tau = \tau^{мод} / \tau^{прир}. \quad (17)$$

В горных породах предел хрупкой прочности пород осадочного чехла ($\tau^{прир}$) первые десятки кГ/см², для глин предел текучести ($\tau^{мод}$) составляет первые Г/см², что дает значение коэффициента $C_\tau \approx 10^{-4}$. Подставляя его в (14), находим, что $C_g \approx 10$, т.е. в экспериментах на глинах, выполняющихся в обычных комнатных условиях, на один порядок занижается вклад в напряженное состояние массовых сил. Для удовлетворения условия подобия по гравитационным силам следует использовать центрифугирование [Рамблер, 1970]. Однако подобные эксперименты имеют своим ограничением размеры модели, они не превышают 5–10 см, что не позволяет рассчитывать на эту технологию для изучения неоднородного простого сдвига.

Задача изучения морфологических параметров хрупкого разрушения определяет необходимость выполнения подобия и для соотношения между девиаторными и полными напряжениями,

наблюдаемыми в природных массивах и создаваемыми в моделях. Это в свою очередь требует близости значений коэффициента Пуассона для модельного материала (влажные глины) и горных пород. Для осадочных пород изменение значений коэффициента Пуассона лежит в диапазоне от 0.25 до 0.4.

Существуют определенные трудности при оценке этого коэффициента для влажных глин из-за низкого уровня деформаций в упругой области их деформирования. В силу большого процентного содержания воды можно ожидать, что коэффициент Пуассона влажных глин лишь немногим меньше 0.5, достигая в отдельных случаях 0.4. Завышение значения коэффициента Пуассона в модели приводит к тому, что девиаторные напряжения, возникающие от действия только массовых сил [Ребецкий, 2008] будут меньше, чем это требуется по условиям подобия. Это предопределяет завышение роли девиаторных напряжений, за создание которых ответственно внешнее нагружение. Заметим также, что в случае, когда в эксперименте изучается эволюция разрывных структур за длительные времена при развитии больших пластических деформаций необходимо выполнение условий подобия и по тектоническому течению, вытекающих из реологического уравнения (15).

Что произойдет, если в моделях, ориентированных на изучение закономерности и морфологии разрывообразования, не будет выполнено условие $C_g \approx 1$ и значения коэффициента Пуассона в модели будут существенно выше, чем в природном объекте, приближаясь к 0.5? В этом случае стандартное напряженное состояние, вызываемое только массовыми силами будет близко к нулю и их влияние на морфологические параметры хрупких разрывов будет практически нулевым. Наши оценки [Ребецкий, 2008] показывают, что в природных объектах до глубин в 2–3 км девиаторные напряжения, вызванные массовыми силами и стесненными условиями деформирования, могут достигать 100–200 кГ/см². Этот уровень девиаторных напряжений сопоставим с ожидаемыми напряжениями от внешних воздействий. Скорости деформаций 10^{-15} , наблюдаемой по GPS данным, и вязкости пород осадочного чехла 10^{22} Па с отвечают напряжения в 10 МПа (100 кГ/см²).

Все выше рассмотренные обстоятельства показывают практически непреодолимые трудности, возникающие на пути физического моделирования структур разрушения с использованием влажных глин. Вероятно более подходящим материалом для подобного моделирования можно рассматривать влажный песок. Во всяком случае значение коэффициента Пуассона для не-

го близко к природному, он также обладает квазипластическими свойствами. Однако прочность сцепления его даже при большой насыщенности водой остается достаточно высокой (первые десятки $\Gamma/\text{см}^2$), что не позволяет выполнить условие подобия по ускорению свободного падения.

В силу указанных свойств влажный песок можно использовать при изучении развития структур разрушения при больших деформаций только для природных объектов, не имеющих больших градиентов плотности и мало развитом

рельефе, в частности, для моделей горизонтального сдвига. Широкие возможности исследования закономерности поля напряжений и структур разрушения для различных механизмах деформирования пород осадочного чехла над активными разломами фундамента создает только математическое моделирование. Ниже будут представлены результаты анализа морфологии хрупких разрывов, опирающиеся на данные математического моделирования механизма горизонтального сдвига.

РАСЧЕТ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ХРУПКОГО СКОЛА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МАССОВЫХ СИЛ

Если гравитационное напряженное состояние создает девиаторные напряжения значительно меньшего уровня, чем горизонтальны движения блоков фундамента (q в выражениях (7) и (9) близко к единице), то тогда данных рис. 23 достаточно для прогноза морфологии хрупких трещин в глубине слоя. Это вариант суммарного напряженного состояния фактически отвечает

результатам физических экспериментов на влажных глинах.

На рис. 27 приведены результаты прогнозного расчета ориентации плоскостей хрупкого скола для суммарного напряженного состояния, когда массовые силы на начальной стадии (до смещения блоков фундамента) создавали девиаторные напряжения. При расчетах величина бо-

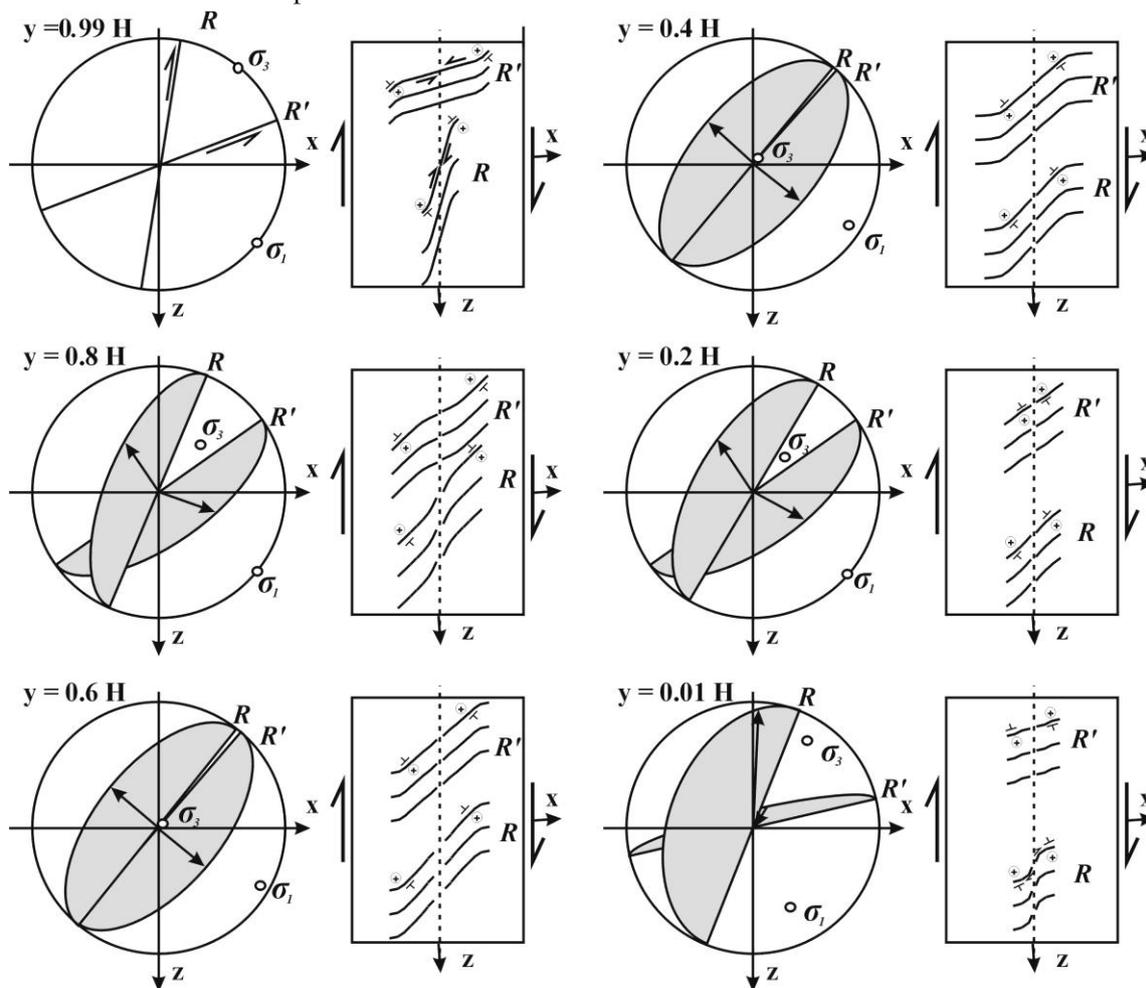


Рис. 27. Ориентация главных напряжений и площадок скалывания вблизи оси сдвига ($x = 0.1 H$) для разных глубин в проекциях на нижнюю полусферу и прогноз изменения положения простирания плоскостей сколов на удалении от оси сдвига (поднятое крыло скола обозначено $+$, а направление погружения плоскости $-$) для суммарного напряженного состояния от действия массовых сил и горизонтального движения блоков основания

кового отпора гравитационного напряженного состояния задавалась равной 0.8 от литостатического давления, а определяющих параметров задачи антиплоской деформации такие же как и при расчетах, представленных на рис. 23. Также как и для чисто антиплоской деформации оценки положения хрупких сколов опирались на другое решение.

Непосредственно на поверхности слоя ориентация простирания R - и R' -сколов такое же как и в случае решения задачи о действии только напряжений, вызванных движениями блоков фундамента (см. рис. 23). Здесь влияние гравитационных напряжений практически отсутствует, а оси алгебраически минимального и максимального главных напряжений субгоризонтальны. Вблизи поверхности ($z = 0.99$ Н) уже на небольшом удалении от оси сдвига ($x = 0.1$ Н) плоскости R -сколов погружаются к осевой плоскости сдвига, а R' -сколов – от нее. При этом вдоль обоих типов сколов наблюдается очень небольшая сбросовая компонента смещения. Оба этих факта различают морфологию сколов от того, что было представлено на рис. 23. Изменение знака смещения вертикальной компоненты для R' -сколов в сравнении с результатами, представленными на рис. 23, связано именно с действием гравитационных напряжений. Приведенные данные подчеркивают различия результатов физического моделирования (см. рис. 16) и реального природного процесса, обусловленные невозможность при постановке физического моделирования выполнить условия подобия по гравитационному воздействию.

С глубиной плоскости R - и R' -сколов разворачиваются, так что их простирания начинают постепенно сближаться, а угол погружения уменьшаться. Вблизи оси сдвига на глубине $y = 0.7$ Н углы между простиранием эти сколов менее 20° , а ось максимального сжатия имеет угол погружения больше 70° . При этом резко растет величина сбросовой компоненты смещений и уменьшается величина сдвига. Для глубины $y = 0.8$ Н они практически равны друг другу, а на глубине $y = 0.7$ Н компонента сброса превышает 90% от общего значения смещения бортов трещины. В средней по глубине части слоя простирания обеих систем сколов практически параллельны друг другу. Здесь влияние гравитационных напряжений на общее напряженное состояние максимально. Обратим внимание, что в этом диапазоне глубин ориентация оси алгебраически максимального напряжения (главного девиаторного растяжения) остается такой же как вблизи поверхности. Разный азимут погружения плоскостей каждой из систем

сколовых трещин, существующих в разных бортах зоны сдвига, определяет винтообразную изогнутость плоскостей скалывания.

Еще глубже, начиная с $y = 0.3$ Н простирания плоскостей скалывания вновь начинают расходиться, меняется угол погружения каждой из систем сколов, а ось максимального сжатия постепенно становится более пологой. Начиная с этих глубин вновь проявляется влияние напряжений, вызываемых горизонтальным движением блоков фундамента. При этом следует иметь в виду, что это влияние резко ослабевает по мере удаления от осевой плоскости зоны сдвига (см. рис. 21). Вблизи подошвы фундамента ($y = 0.01$ Н) на очень небольшом удалении от оси сдвига ($y = 0.01$ Н) оси алгебраически максимального и минимального главных напряжений имеют углы погружения около 40° , а их простирания отклонены от оси сдвига на углы менее 35° . Здесь напряженное состояние близко к взрезному режиму [Ребецкий, 2007]. Для этого состояния характерным является субвертикальная и субгоризонтальная ориентация плоскостей сколовых трещин. В нашем случае вблизи оси сдвига.

Расчеты показывают, что для небольших глубин по мере удаления от оси сдвига происходит разворот простирания плоскостей скалывания, они становятся субпараллельны друг другу. Таким образом в плане трещины одной системы для обоих бортов зоны сдвига принимают S -образную форму. Этот разворот определяется уменьшением влияния на суммарное напряженное состояние напряжений, вызываемых смещением блоков основания (фундамента). В этом случае роль девиаторных напряжений от гравитационного напряженного состояния становится определяющей. Поскольку это состояние соответствует горизонтальному растяжению, то в этой части сколов относительно общей амплитуды увеличивается компонента сброса в смещениях его бортов. Гравитационному состоянию отвечает равенство напряжений главных напряжений, действующих в латеральном направлении. Вероятно разворот простирания обеих систем прогнозируемых сколов до субортогонального к оси сдвига связано с точностью наших оценок и его не надо воспринимать как твердо установленное.

Мы исследовали влияние на морфологию систем прогнозируемых сколовых трещин напряжений дополнительного сжатия или растяжения, действующих в латеральном направлении. На рис. 28 в проекциях на нижнюю полу сферу показана ориентация плоскостей скалывания и направление смещения «висячего» крыла трещины для случая, когда ортогонально оси

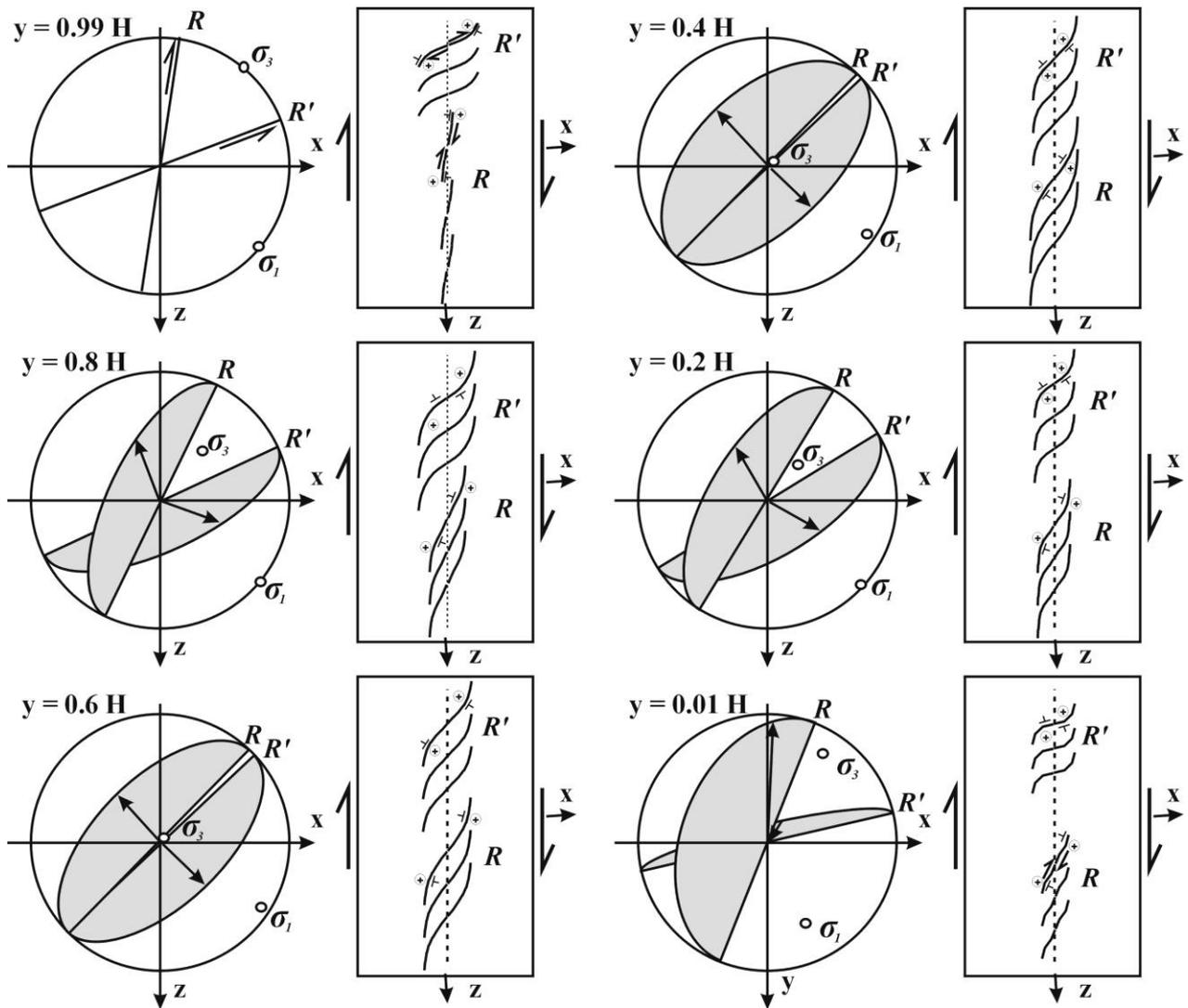


Рис. 28. Ориентация главных напряжений и площадок скальвания вблизи оси сдвига ($x = 0.1 H$) для разных глубин в проекциях на нижнюю полусферу и прогноз изменения положения простирания плоскостей сколов на удалении от оси сдвига (поднятое крыло скола обозначено $+$, а направление погружения плоскости $- \perp$) для суммарного напряженного состояния от действия массовых сил, горизонтального движения блоков основания и латерального растяжения

сдвига в латеральном направлении действует дополнительное растяжение, постоянной по глубине интенсивности (формирование зоны сдвига в обстановке дополнительного растяжения). Уровень этих напряжений составлял менее 7% от величины литостатического давления на подошве слоя. Дополнительные девиаторные напряжения от этого латерального растяжения составляли менее 40% от величины девиаторных напряжений, вызываемых массовыми силами также у подошвы слоя. Таким образом, дополнительные напряжения были достаточно значимы, но уровень девиаторных напряжений, ими создаваемый, был сопоставим с уровнем девиаторных напряжений, создаваемых гравитационным напряженным состоянием.

Как следует из графики, приведенной на рис. 28, ориентация плоскостей скальвания вблизи оси сдвига практически не изменяет-

ся. Наибольшее влияние дополнительное латеральное растяжение оказывает на морфологию сколов на несколько большем удалении от оси сдвига, где в сравнении с данными, приведенными на рис. 27 меняется направление изгиба простирания сколов.

Объединенные системы сколы обеих крыльев зоны сдвига принимают зеркально перевернутую S-образную форму. Разворот обеих систем сколов происходит в одном направлении, так, что их простирания стремятся стать ортогональными ориентации дополнительного растяжения. Подобное изменение геометрии R-сколов (R'-сколы в природе на продвинутых стадиях образования зоны сдвига образуются редко [Keller et al., 1982]) может являться хорошим прогностическим фактором для определения ориентации оси главного растяжения исходного (до формирования зоны сдвига) или регио-

нального (масштаб осреднения с характерным линейным размером много большим протяженности зоны сдвига) напряженного состояния. Отметим, что введение в ортогональном к оси сдвига направлении дополнительного сжатия приводит к изгибу простирающихся систем сколов на некотором удалении от центральной части в противоположном направлении, чем это показано на рис. 28 и в соответствии с тем, что было изображено на рис. 27 для средних по глубине горизонтальных планов.

Для глубинных участков слоя полученная морфология трещин следует рассматриваться как прогнозная. Наиболее вероятно, что вблизи подошвы слоя в природном объекте развивается только одна из систем сколов – *R*-сколы.

Таким образом, прогнозируемая согласно нашим расчетам форма поверхности *R*-сколов, развивающаяся по всей глубине зоны сдвига обоими ее крыльями, в большей части мощности слоя совпадает с формой приведенной в работе [Sylvester, 1988] (см. рис. 29). Ее построение Сильвестер объяснил необходимостью совместить простирающиеся эти сколы на поверхности модели и ориентацию сдвига блоков фундамента. Различия наблюдаются в самой нижней части слоя вблизи фундамента. Здесь согласно нашим оценкам (рис. 27, 28) углы погружения *R*-сколов уменьшаются, их плоскости должны выполаживаться, а простирающиеся плоскости разворачиваться ближе к оси сдвига в сравнении со средними глубинами. Заметим, что не смотря на некоторый разворот простирающихся *R*-сколов не совпадает с осью сдвига. Можно предположить, что в реальных материалах вблизи фундамента может происходить заложение трещин типа *L*-сколов

также как это наблюдается в экспериментах на глинах вблизи поверхности.

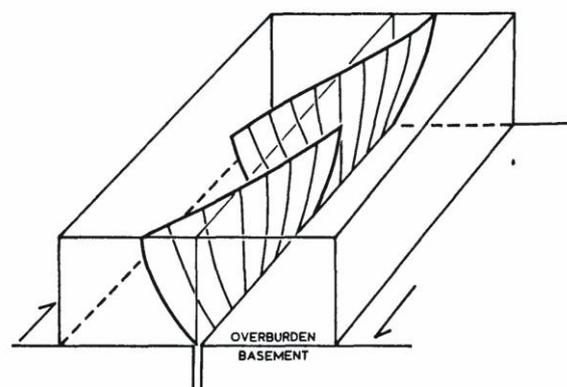


Рис. 29. Прогноз формы поверхности *R*-сколов в глубине модели, данный в работе [Sylvester, 1988].

Предположение о возможности появления таких *L*-сколов у подошвы слоя над сдвигающимися блоками фундамента сближает результаты наших оценок и прогноз, выполненный в работе [Sylvester, 1988]. Однако ни в этой работе, ни в других исследованиях морфологии хрупких разрывов [Harris, Cobbold, 1984; Hancock, 1985; Naylor, Mandl, 1986] в зоне сдвига не говорится о сбросовой компоненте смещения разрывов, выраженных на поверхности как *R*-сколы. Эта компонента в экспериментах на песчаных [Naylor, Mandl, 1986] и глиняных [E. Cloos, 1955] моделях и не могла быть получена из-за отмеченного выше невыполнения условия подобия по гравитационной компоненте. Таким образом, данные, представленные на рис. 27, 28, впервые с теоретических позиций механики разрушения дают прогноз разрывных структур в глубине зон сдвига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный нами обзор показал, что в зависимости от способа внешнего нагружения в моделях может возникать поле напряжений различной закономерности от однородного во всем объеме, до неоднородного в двух направлениях (вкrest оси сдвига и по глубине). При прогнозе структур разрушения участка осадочного чехла, подвергающегося сдвиговому режиму нагружения, следует выяснить специфику условий нагружения, разделяя сдвиг за счет движения боковых масс (неоднородный по латерали) и сдвиг за счет движения блоков фундамента (неоднородный по глубине). Условия внешнего нагружения определяют место локализации разрушений и кулисообразный характер разрывов в зоне сдвига.

Результаты математического моделирования, показали, что в моделях горизонтального сдвига, вызываемого движением жестких подложек,

формируется неоднородное напряженное состояние не только по латерали (вкrest простирающейся зоны сдвига), но и по глубине. Подобная неоднородность определяет изменение ориентации осей главных напряжений в объеме модели, что предопределяет смену типа напряженного состояния от взрезового у подошвы модели на небольшом удалении от оси сдвига до сдвигового вблизи поверхности, а также по всей глубине модели вдоль оси сдвига. Сделанный нами обзор показал, что этот важный вывод, который был сделан еще в конце 80х годов прошлого века, остался незамеченным, хотя он определял изменение морфологии и кинематики структур разрушения в глубине модели (взбросы и сбросы у подошвы и сдвиги у поверхности). В ряде экспериментов (модели В.Д. Парфенова и С.А. Борнякова) даже по наблюдениям за поверхностью модели было заме-

чено наличие небольшой сбросовой компоненты у R -сдвигов и взбросовой у R' -сдвигов. Эта кинематика структур разрушения соответствует прогнозируемой из математического моделирования.

Еще один важный вывод следует из анализа соблюдения условий подобия при моделировании. Оказалось, что моделирование с соблюдением условий подобия пытались осуществлять только для влажных глин. Наш анализ условий проведения этих экспериментов показал, что расчет коэффициентов подобия делался в условиях естественной силы тяжести, исходя из положения о подобии деформационных процессов на длительных временах, т.е. требовали выполнения условия подобия по вязкости. Однако если задачей эксперимента является изучение морфологии формирующихся трещин, то условия подобия следует рассчитывать из условия одинаковости реализуемого в природе и в модели типа хрупкого разрушения (по Мизесу или Кулону) и подобия прочностных параметров. Наши расчеты показали, что в этом случае в проводившихся экспериментах сила тяжести должна быть почти на порядок большее естественной. Из указанного факта следовало, что в экспериментах на глинах сила тяжести была недооценена.

Кинематика разрывов и их морфология зависят от сочетания напряженных состояний от внешнего

условия нагружения и от внутренних – массовых сил. Поскольку по глубине эти факторы изменяют свою интенсивность неодинаково, то параметры разрывных нарушений по глубине разрезов должны изменяться. Учет этих положений важен для безопасной и эффективной эксплуатации месторождений.

Представленные в настоящей работе результаты хорошо согласуются с данными, полученными в результате применения технологии 3Д-сеймики [Гогоненков и др., 2007]. В осадочном чехле районов разработки углеводородных залежей Западной Сибири выявлены кулисообразные разрывные структуры, имеющие ярко выраженную сбросовую компоненту смещения. В указанной высказывается аргументированная гипотеза о формировании этих структур в результате горизонтального сдвигания глубинных разломов кристаллического фундамента (глубины 3–4 км). Пропеллерообразный вид поверхности указанных разрывов обоих крыльев зоны сдвига и разворот их простирания по мере удаления от оси сдвигания подобен изменению простирания R -сколов, представленном на рис. 28.

Работа выполнена при поддержке программой № 6 ОНЗ РАН и грантами РФФИ 06-05-64410, 06-08-01291, 06-05-64888, 07-05-00106.

ЛИТЕРАТУРА

- Адамович А.Н.* Математическое моделирование напряженного состояния в зонах разломов и оценка условий их активизации. Иркутск: ИЗК СО АН СССР. 1985. Деп. в ВИНТИ 08.08.85. № 5932-85. 13 с.
- Ажгирей Г.Д.* Структурная геология. М.: МГУ. 1956. 493 с.
- Андрейкив Ф.Е.* Разрушение квазихрупких тел с трещинами при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка. 1979. 138 с.
- Бабичев А.А.* О некоторых принципиальных вопросах использования критериев подобия при моделировании трещин и разрывов // Геология и геофизика. 1987. № 4. С. 36-42.
- Бабичев О.В., Стаховская З.И., Соболев Г.А.* и др. О влиянии давления на процессы подготовки и предвестники разрушения горной породы // Изв. АН СССР, Сер. Физика Земли. 1981. № 1. С. 26-35.
- Баренблатт Г.И.* Об основных представлениях теории равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // Проблемы механики сплошной среды. М.: Изд. АН СССР. 1961. С. 29-45.
- Бокун А.Н.* Некоторые закономерности образования разрывных зон в осадочном чехле при погружении блоков фундамента (по результатам физического моделирования) // Эксперим. тектон. и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка. 1991. С. 112-120.
- Бокун А.Н.* Структурные особенности сдвиговых зон на завершающей стадии их развития (по результатам физического моделирования) // Механизмы структурообразования в литосфере и сейсмичность. Тез. докл. Всесоюз. Симп. «Эксперим. тект. в решении задач теорет. и практ. геол.». М.: Изд. ИФЗ АН СССР. 1991. С. 115-116.
- Бокун А.Н., Воронов П.С.* Тезисы докладов 1-го Всес. Сов. По сдвиговой тектонике. Вып.1. Л.: 1988.
- Бондаренко П.М.* Моделирование полей напряжений, прогноз дислокаций в сдвиговых зонах и их систематика // Сдвиговые тектонические напряжения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. М.: Наука. 1991. С. 37-52.
- Бондаренко П.М., Сим Л.А.* Моделирование полей тектонических напряжений в зонах динамического влияния разломов Карелии (в связи с прогнозом сейсмической опасности). // Тектонофиз. аспекты разломообразования в литосфере. Тез. Всесоюз. сов. «Разломообразов. в литосф.: тектонофиз. аспекты». Иркутск: 1990.

- С. 62.
- Бондаренко П.М., Лучицкий И.В.* Сдвиги и зоны скалывания в тектонических полях напряжений // Разломы земной коры. Новосибир.: 1982. С. 159-182
- Бондаренко П.М., Лучицкий И.В.* Сдвиги и зоны скалывания в тектонических полях напряжений // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука. 1985. С. 159-182.
- Борняков С.А.* Динамика развития деструктивных зон межплитных границ (результаты моделирования) // Геология и геофизика. 1988. № 6. С. 3-10.
- Борняков С.А.* Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в упруговязкой модели // Проблемы разломной тектоники. Новосибир.: 1981. С. 26-44.
- Борняков С.А., Адамович А.Н.* Механизм сегментации и характер взаимодействия сегментов (по результатам физического и математического моделирования) // Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского). М.: Изд. ОИФЗ. 2002. С. 203-211.
- Борняков С.А.* Закономерности структурно-динамического развития сдвиговой зоны и их отражение во фрактальных размерностях (по результатам физического моделирования) // Теория диссипативных структур в геологическом анализе. Материалы IV конференции по геологической синергетике. 1998. С. 18-20.
- Борняков С.А.* Количественный анализ параметров разномасштабных сдвигов // Геология и геофизика, 1990. № 10. С.34-42.
- Борняков С.А.* Механизм сегментации разломов и их фрактальные свойства (по результатам физического моделирования) // Материалы XXXII Тектонического совещания 2-5 февраля 1999 г., Москва. М.: 1999. С. 92-96.
- Борняков С.А.* Моделирование сдвиговых зон на упруговязких моделях // Геология и геофизика. 1980. № 11. С. 75-84.
- Борняков С.А.* Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в упруго-вязкой модели // Проблемы разломной тектоники. Новосибир.: СО Наука. 1981. С. 26-44.
- Борняков С.А., Гладков А.С., Адамович А.Н.* и др. Информационная энтропия и фрактальная размерность как критерии самоорганизации систем разрывов в зонах разломов (по результатам физического моделирования) // ДАН 2003. Т. 391, № 2. С. 250-253.
- Борняков С.А., Гладков А.С., Матросов В.А., Адамович А.Н., Клепиков В.А.* Нелинейная динамика разломообразования по результатам физического моделирования // Геотектоника. 2004. № 5. С. 85-95.
- Борняков С.А., Шерман С.И.* Многоуровневая самоорганизация деструктивного процесса в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования) // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3, № 4. С. 107-115
- Борняков С.А., Шерман С.И.* Стадии развития сдвиговой зоны и их отражение в соотношениях амплитуд смещения с длинами разрывов // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 7. С. 712-718.
- Борняков С.А., Шерман С.И., Гладков А.С.* Структурные уровни деструкции в сдвиговой зоне и их отражение во фрактальных размерностях (по результатам физического моделирования) ДАН. 2001. Т. 377, № 1. С. 72-75.
- Борняков С.А., Шерман С.И., Гладков А.С.* Фрактальная размерность как показатель качественного состояния деструктивного процесса в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования) // Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В.Гзовского). М.: Изд. ОИФЗ. 2002. С. 186-193.
- Буддо В.Ю., Бабичев А.А.* Закономерности развития деформаций в зоне формирующегося сдвига (результаты моделирования) // Эксперим. тектон. В решении задач теорет. и практич. геол. тезисы докл. 2-го Всес. Симп. Киев: 1987. С. 59-60
- Буддо В.Ю., Бабичев А.А.* Методика и эксперимент по изучению поля сдвиговых деформаций в объеме упруговязкопластичной модели. // Эксперим. тект. в решении задач теорет. и практич. геол. тезисы докл. 2-го Всес. Симп. Киев: 1987. С. 69-70
- Буддо В.Ю., Бабичев А.А.* Миграция деформаций в развивающихся зонах крупных сдвигов (моделирование) // Активные разломы: методы изучения, морфология, кинематика, геодинамика. Иркутск: 1989. Ч. 1. С. 4
- Буртман В.С., Лукьянов А.В., Пейве А.В. и др.* Горизонтальные перемещения по разломам и некоторые методы их изучения // Разломы и горизонтальные движения земной коры. М.: Изд. АН СССР. 1963. С. 5-33.
- Гарагаш И.А., Жорин В.А., Лившиц Л.Д., Николаевский В.Н.* Сверхпластическое течение материала внутри разлома // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1986. № 1. С. 12-24.
- Гептнер Т.М.* Моделирование трещин скалывания в условиях больших деформаций // Вестн. МГУ, сер. геол. 1970. № 4. С. 81-89.
- Гзовский М.В.* Моделирование тектонических полей напряжений и разрывов // Изв. АН СССР, серия геоф. 1954. №6.
- Гзовский М.В.* Методы моделирования в тектонофизике // Сов. геол. № 4. 1958.
- Гзовский М.В.* Основные вопросы тектонофизики

- и тектоника Байджансайского антиклинория, Ч. I, П. М.: АН СССР. 1959. 255 с.
- Гзовский М.В.* Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. III, IV. М.: АН СССР. 1963. 544 с.
- Гзовский М.В.* Моделирование тектонических процессов // Проблемы тектонофизики. М.: Госгеолтехиздат. 1960.
- Гзовский М.В., Осокина Д.Н., Кузнецова И.Н.* Применение поляризационно-оптического метода при моделировании геологических процессов. // Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Л.: Изд. ЛГУ. 1960.
- Гзовский М.В., Осокина Д.Н. и др.* Моделирование влияния древних разрывов в земной коре на ее напряженное состояние // Труды VII Всес. конф. по поляризационно-оптическому методу исследования напряжений. Таллин: 1971.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
- Гинтов О.Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс. 2005. 572 с.
- Гинтов О.Б., Исай В.М.* Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов // Геофиз. журнал. 1984. Т. 6, № 3. С. 3-10.
- Гинтов О.Б., Исай В.М.* Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов. // Геофиз. журнал. 1984. Т. 6, № 4. С. 3-14.
- Гинтов О.Б., Исай В.М.* Кинематические особенности взаимодействия между структурами второго порядка сколовых разломов центральной и западной части Украинского щита // Докл. АН УССР, сер. Б. 1985. № 3. С. 11-14.
- Гинтов О.Б., Исай В.М.* Методы морфокинематического анализа разломов // Геофиз. журн. 1986. Т. 8, № 1. С. 53-61.
- Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И.* Горизонтальные фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3-18.
- Гольштейн Р.В., Капцов А.В.* Формирование структур разрушения слабо взаимодействующих трещин // Изв. АН СССР, МГТ. 1982. № 4. С. 173-182.
- Григорьев А.С.* О математическом моделировании в тектонофизике // Эксперим. тект. и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка. 1991. С. 21-29.
- Григорьев А.С., Волович И.М., Ребецкий Ю.Л.* Задача о кинематике и напряженном состоянии слоя при смешанных краевых условиях в связи с интерпретацией современных движений в плат форменных областях // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1989. № 7. С. 38-54.
- Гутерман В.Г.* Механизмы тектогенеза. Киев: Наукова думка. 1987. 171 с.
- Гутерман В.Г., Кобылянский В.Б.* Морфологические особенности сдвиговых зон разного генезиса (результаты моделирования на центрифуге) // Эксперим. тект. в решении задач теорет. и практ геол., тезисы докл. 2-го Всес. Симп. Киев: 1987. С. 29-30.
- Динник А.Н.* О давлении горных пород и расчете крепи круглой // Инженерный работник. 1926. № 3. С. 1-12.
- Емец В.С., Корчемагин В.А., Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В.* // Эксперим. тект. в решении задач теорет. и практ геол., тезисы докл. 2-го Всес. Симп. Киев: 1987. С. 79-80
- Забродин П.С., Мишин Н.И., Тихонов С.Д.* Методические указания по геометризации и прогнозу разрывных нарушений в пределах выемочных участков для шахт Кузбасса. Л.: ВНИМИ. 1973. 73 с.
- Исая В.М.* Закономерности разломообразования в консолидированной коре // Эксперим. тект. и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка. 1991. С. 158-165.
- Кобылянский В.Б.* Влияние граничных условий на сколообразование в моделях простого сдвига и сжатия // Эксперим. тект. и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка. 1991. С. 103-106.
- Кожурин А.И., Трифонов В.Г.* Молодые сдвиги обрамления Тихого океана // Геотектоника. 1982. № 2. С. 3-18.
- Кокер Э., Файло Л.* Оптический метод исследования напряжений. ОНТИ. 1936.
- Крупенников Г.А., Филатов Н.А., Амусин Б.З., Барковский В.М.* Распределение напряжений в природных массивах. М.: Недра. 1972. 143 с.
- Лир Ю.В., Шакин С.С.* Математическое моделирование напряжений на участках кулисообразных трещин // Изв. ВУЗов, геол. и разв. 1988. № 9. С. 33-37.
- Лир Ю.В., Шакин С.С.* Строение и эволюция рудовмещающих разрывных нарушений сдвигового типа. // Сдвиговые тектонические напряжения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. М.: Наука. 1991. С. 149-161.
- Лир Ю.В., Шакин С.С.* Условия активизации кулисообразно расположенных рудовмещающих сдвигов. М.: 1987. Деп. В ВИЭМС 24.07.87, № 451. 20 с.
- Лир Ю.В., Шакин С.С., Кистеров К.В.* Особенности развития рудовмещающих трещинных структур // Геология рудных месторождений. 1982. № 1. С. 23-30.
- Лобацкая Р.М.* Об изменении линейных размеров структур оперения в крыльях крупных раз-

- ломов // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266, № 5. С. 1209-1211.
- Лукьянов А.В.* Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М.: Наука. 1965. 210 с.
- Лукьянов А.В.* Эксперимент в тектонике // Экспериментальная тектоника. М.: Наука. 1989. С. 9-31.
- Лучицкий И.В., Бондаренко П.М., Громин В.И.* Изучение разломов экспериментальными методами // Разломы земной коры. М.: Наука. 1977. С. 144-154.
- Майданович И.А.* Структуры узлов пересечения крупных сдвигов в южной части Донецкого бассейна // Геотектоника. 1972. № 4. С. 69-75.
- Михайлова А.В.* Методика количественной оценки перемещений, деформаций и напряжений в пластических непрозрачных моделях // Тектонофизика и механические свойства горных пород. М.: Наука. 1971. С. 38-48.
- Михайлова А.В.* Методические вопросы создания и исследования тектонических моделей с применением пластичных эквивалентных материалов // Экспериментальная тектоника: методы, результаты, перспективы. М.: Наука. 1989. С. 209-227.
- Михайлова А.В.* Изучение механизмов формирования тектонических структур в осадочном чехле над активными разломами фундамента с применением физического моделирования // Напряжения в литосфере. Тез. докл. 1-го Междунар. семинара. М.: Изд. ИГИРГИ. 1994. С. 112-113.
- Михайлова А.В.* Исследование механизмов формирования тектонических структур в слое над активными разломами фундамента в свете учения М.Г. Гзовского // Тектонофизика сегодня. М.: Изд. ОИФЗ РАН. 2002. С. 212-224.
- Михайлова А.В.* Геодинамические характеристики структур, образовавшихся в слое над активными разломами фундамента // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сб. Трудов Восьмых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. М.: ГЕРС. 2007. С. 111-118.
- Михайлова А.В., Осокина Д.Н.* Изучение соотношений между характеристиками вертикальных перемещений поверхности и величиной деформаций на глубине (на моделях) // Современные движения земной коры. Тарту: 1973. № 5. С. 589-594.
- Мораховский В.Н.* Сдвиги и сдвиговые деформации в земной коре // Сдвиговые тектонические напряжения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. М.: Наука. 1991. С. 20-26.
- Муди Д.Д., Хилл М.Л.* Сдвиговая тектоника // Вопросы современной зарубежной тектоники. М.: Мир. 1960. С. 265-333.
- Надаи А.* Пластичность. М.: Л: Мир. 1936. 280 с.
- Невский В.А.* О внутреннем строении разломов // Геотектоника. 1967. № 1. С. 83-96.
- Несмеянов С.А., Бархатов И.И.* Новейшие и сейсмогенерирующие структуры Западного Гиссаро-Алая. М.: Наука. 1978. 119 с.
- Никонов А.А.* Голоценовые и современные движения земной коры. М.: Наука. 1973. 239 с.
- Новожилов В.В.* Основы нелинейной теории упругости. М.-Л.: 1948. 211 с.
- Осокина Д.Н.* Пластичные оптически активные материалы для моделирования тектонических процессов // Проблемы тектонофизики. М.: Госгеолтехиздат. 1960.
- Осокина Д.Н.* Пластичные и упругие низко-модульные оптически-активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М.: АН СССР. 1963. 196 с.
- Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю.* Метод моделирования локальных полей напряжений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 139-162.
- Осокина Д.Н., Фридман В.Н.* Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 74-119.
- Осокина Д.Н.* Взаимосвязь смещений по разрыву с тектоническим полем напряжений и некоторые вопросы разрушения массива // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 120-136.
- Осокина Д.Н.* Количественный анализ взаимосвязей смещений по разрывам с полями напряжений и вторичное разрывообразование // Эксперим. тект. и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка. 1991. С. 72-83.
- Осокина Д.Н.* Исследование механизмов деформирования массива в зоне разрыва на основе изучения трехмерного поля напряжений (математическое моделирование) // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука. 2000. С. 220-245.
- Осокина Д.Н.* Поле напряжений, разрушение и механизмы деформирования геосреды в зоне разрыва (математическое моделирование) // Тектонофизика сегодня. М.: Изд. ОИФЗ РАН. 2002. С. 129-172.
- Павлинов В.Н.* Глубинные сдвиги и парагенетически сопряженные с ними дизъюнктивные структуры // ИзвВузоз, Геология и разведка. 1977. № 8. С. 3-14; № 9. С. 3-13.
- Парфенов В.Д., Жуковский С.Д.* Моделирование хрупкого разрушения в условиях деформации

- сдвига // Геотектоника. 1966. № 4. С. 112-117.
- Плотников Л.М.* Роль сдвига в деформациях геологических тел // Сдвиговые тектонические напряжения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. М.: Наука. 1991. С. 27-37.
- Плотников Л.М.* Структуры сдвига в слоистых геологических телах. Л.: Недра. 1991. 151 с.
- Пэк А.В.* Трещинная тектоника и структурный анализ. М.-Л.: Изд. АН СССР. 1939. 149 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др.* Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига // Новосибир.: СО Наука. 1991. 262 с.
- Рамберг Х.* Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. М.: Мир. 1970. 224 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряжённое состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 41-57.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряжённое состояние слоя при продольном сдвиге // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1988. № 9. С. 29-35.
- Ребецкий Ю.Л.* О кинематике поверхности земной коры в областях с длительно действующими сдвиговыми напряжениями (математическое моделирование) // Механизмы структурообразования в литосфере и сейсмичность. Тез. докладов III Всес. Симп. «Эксперимент. тект. в решении задач теорет. и практ. геол.» М.: Изд. ИФЗ АН СССР. 1991. С. 148-149.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27, № 1. С. 39-54.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясений // Доклады РАН. 2005. Т. 400, № 3. С. 372-377.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006. Т. 47, № 11. С. 1192-1206.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: ИКЦ Академкнига. 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений землетрясений // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 1, № 11. С. 66-73
- Роль сдвиговой тектоники в структуре литосфер Земли и планет земной группы // Отв. ред. П.С. Воронов. СПб.: Наука. 1997. 591 с.
- Ружич В.В., Шерман С.И.* Оценка связи между длиной и амплитудой разрывных нарушений // Динамика земной коры Восточной Сибири. Новосибир.: 1978. С. 52-57.
- Саньков В.А., Семинский К.Ж.* Анализ смещений по разрывам в зоне формирующегося трансформного разлома // Изв. ВУЗов, Геология и разведка. 1988. №4.
- Семинский К.Ж.* Анализ распределения опережающих разрывов при формировании крупных дизъюнктивов // Геология и геофизика. 1986. № 10. С.9-18.
- Семинский К.Ж.* Общие закономерности динамики структурообразования в крупных сдвиговых зонах. // Геология и геофизика. 1990. № 4.
- Семинский К.Ж.* Пространственно-временные взаимоотношения между тектоническими нарушениями в разрывных зонах // Геология и геофизика. 1991. № 3. С. 74-84.
- Семинский К.Ж.* Соотношения углов между системами сопряженных трещин вблизи сместителей сдвигов, сбросов и надвигов // Докл. РАН. 1997. Т. 354, № 3. С. 361-363.
- Семинский К.Ж.* Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск: ИЗК СО АН СССР. 1986. Деп. ВИНТИ 13.08.86. №5762-В86. 130 с.
- Семинский К.Ж.* Миграция зоны опережающих разрывов при формировании крупных сдвигов // Эксперим. тект. и полевая тектонофизика. Киев. Наукова думка. 1991. С. 244-252.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Новосибир.: Изд. СО РАН филиал Гео. 2003. 242 с.
- Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам // Изв. Вузов, Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3-27.
- Семинский К.Ж., Гладков А.С.* Новый подход к изучению тектонической трещиноватости в разрывных зонах // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 130-140.
- Сим Л.А., Сергеев А.А.* Методика изучения неотектонических напряжений и разломной тектоники платформенных областей) // Неотектоника и совр. геодинамика контин. и океанов. Тез. докл. XXIХ Тект. сов. М.: 1996. С. 135-136.
- Сим Л.А.* Возрастные и ранговые взаимоотношения парагенезов опережающих разрывов сдвиговых зон в связи с реконструкцией неотектонических напряжений платформ. // Структурные парагенезы и их ансамбли. М-лы сов. М.: ГЕОС. 1997. С. 158-161.
- Ситтер Л.У.* Структурная геология. М.: Изд. Иностран. лит-ры. 1960. 470 с.
- Стоянов С.* Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра. 1977. 144 с.
- Тёркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. Геологи-

- ческие приложения физики сплошных сред: В 2-х частях. М.: Мир. 1985. 727 с.
- Уткин В.П. Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука. 1980. 144 с.
- Уэлман Г.В. Сдвиговые (транскуррентные) системы разрывов // Земная кора и верхняя мантия. М.: 1972. С. 468-473.
- Черезов А.М., Шубин Г.В. Волновой механизм формирования разрывных зон // Тр. Ин-та геол. и геофиз. СО РАН. 1990. Вып. 755. С. 136-144.
- Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука. 1983. 240 с.
- Шамина О.Г., Павлов А.А., Стрижков С.А. Моделирование сдвиговой подвижки по готовому разлому с трением // Исследования по физике землетрясений. М.: 1976. С. 55-67.
- Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. №10. С. 10-19.
- Шерман С.И., Гинтов О.Б., Борняков С.А. и др. Характер разломообразования в консолидированной земной коре и моделирование зон скалывания // Геофиз. журн. 1988. Т. 10, № 1. С. 13-20.
- Шерман С.И. Сдвиги и трансформные разломы литосферы (тектонофизический анализ проблемы) // Проблемы разломной тектоники. Новосибир.: 1981. С. 5-26.
- Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С.8-18.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибир.: СО Наука. 1983. 112 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А. Эволюция сдвиговых деструктивных зон литосферы: интерпретация результатов физического моделирования на базе мезомеханики // Тектоника Неогей: общие и региональные аспекты. М.: 2001. Т. 2. С. 320-324.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибир.: СО Наука. 1983. 112с.
- Шерман С.И., Гинтов О.Б., Борняков С.А. и др. Характер разрывообразования в консолидированной земной коре и моделирование зон скалывания // Геофизический журнал. 1988. Т. 10, № 1. С. 13-20.
- Шерман С.И., Молчанов А.Е., Адамович А.Н., Саньков В.А. Неравномерность проявления сейсмической активности в сдвиговых зонах // Геология и геофизика. 1989. № 11. С. 3-11.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере: зоны сдвига. Новосибир.: СО Наука. 1991. 261 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. и др. Моделирование механизма образования сейсически активных разломов в упруговязкой среде // Геология и геофизика. 1985. № 10. С. 9-19.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (по результатам моделирования). Новосибир.: СО Наука. 1983. 112 с.
- Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Ред. Б.С. Касаткин. Киев: Наукова Думка. 1981. 584 с.
- An L.-J., Sammis C.G. Development of strike-slip faults: shear experiments in granular materials and clay using a new technique // J. Struct. Geology. 1996. V. 18, No 8. P. 1061-1077.
- Ayrton S. High fluid pressure, isothermal surfaces and the initiation on nappe movement // Geology. 1980. V. 8. P. 172-174.
- Biddle, K.T., Cristie-Blick N. Glossary - Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation // Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. Society of Economic paleontologists and mineralogists. 1985. Special publication No 37. P. 375-385
- Bombolakis E.G. Photoelastic study of initial stages of brittle fracture in compression // Tectonophysics. 1968. V. 6, No. 6. P. 461-473.
- Bornyakov S.A., Adamovich A.N. Mechanism of fault segmentation and character of segment interaction (from results of physical and mathematical simulation). // Journal of Earthquake Prediction Research. 2000. V. 8, No 4. P. 471-485.
- Braun J. Three-dimensional numerical simulations of crustal-scale wrenching using a non-linear failure criterion // J. Struct. Geology. 1994. V. 16, N 8. P. 1173-1186.
- Chinnery M.A. The stress changes that accompany strike slip faulting // Geol. Soc. Am. Bull. 1963. V. 53, No 5. P. 921-932.
- Choukroune P., Gapais D., Merle O. Shear criteria and structural symmetry // J. Struct. Geology. 1987. V. 9. P.525-530.
- Cloos E. Experimental analysis of fracture patterns // Bull. Geol. Soc. Amer. 1955.V. 66, No 3. P. 231-256.
- Cloos E. Experimental of Gulf Coast fracture patterns // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1968. V. 52, No 3. P. 182-187.
- Cloos H. Experiment zur inneren tektonik // Z. Mineral. 1928. V. 12. P. 609-621.
- Cloos H. Zur experimentellen Tektonik. 1. Vergleichende Analyse dreier Verschiebungen. Geol. Rundschau. 1930. V. 21, No 6. P. 353-367.
- Cloos H. Zur experimentellen Tektonik. Methodik und Beispiele. Naturwissenschaften, Jahrg. 1930. 18. H.34. P. 741-747.

- Courtilot V., Tapponier P., Varet J.* Surface features associated with transform faults: a comparison between observed examples and an experimental model // *Tectonophysics*. 1974. V. 24. P. 317-329.
- Coward M.P., Nell P.R., Talbot J.* An analysis of the strain associated with the Moine thrust zone, Assynt, Northwest Scotland // *Structural geology of fold and thrust belts* Baltimor and London: Johns Hopkins Univ. Press. 1992. P. 105-122.
- Cowie P.A., Shipton Z.K.* Fault tip displacement gradients and process zone dimensions // *J. Struct. Geology*. 1998. V. 20, No 8. P. 983-997.
- Cox S.J.D., Scholz C.H.* On the formation and growth of faults: An experimental study // *J. Struct. Geology*. 1988. V. 10. P.413-430.
- Cox S.J.D., Scholz C.H.* Rupture initiation in shear fracture of rocks: an experimental study // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 93, No B4. P. 3307-3320.
- Daly M.C. et al.* The reactivation of steep basement shear zones and their influence on rift basins in Africa // *Inversion Tectonics*. Geol. Soc. Sec. Publ. 1989. No 44. P. 309-334
- Dauteuil O., Mart Y.* Analogue modeling of faulting pattern, ductile deformation and vertical motion in strike-slip fault zones // *Tectonics*. 1998. V. 17, No 2. P.303-310.
- Dubey A.K.* Model experiments showing simultaneous development of folds and transcurrent faults // *Tectonophysics*. 1980. V. 65. P. 69-84.
- Emmons R.C.* Strike-slip rupture patterns in sand models // *Tectonophysics*. 1969. V. N 7. P.71-87
- Filder G.* Strike-slip faulting in the Vaporum region of the Moon // *Quart. J. Geol. Soc.*, 1964. V. 120.
- Fox P.J., Gallo D.G.* A tectonic model for ridge – transform – ridge boundaries: Implication for the structure of oceanic lithosphere // *Tectonophysics*. 1984. V. 104. P. 205-242
- Garfunkel Z., Ron H.* Block rotation and deformation by strike-slip faults 2. The properties of a type of macroscopic discontinuous deformation // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90, No B10. P.8589-8602
- Granier T.* Origin, damping and pattern of development of faults in granite // *Tectonics*. 1985. V. 4. No 7. P. 721-737.
- Hancock P.L.* Brittle mirotectonics: principles and practice // *J. Struct. Geol.* 1985. V. 7, No. 3/4, P. 437-457.
- Harris L.B., Cobbold P.R.* Development of conjugate shear bands during bulk simple shearing // *J. Struct. Geol.* 1984. V. 7, No 7. P. 37.
- Hempton M.R., Neher K.* Experimental fracture, strain and subsidence patterns over an echelon strike-slip faults: implications for the structural evolution of pull-apart basins // *J. Struct. Geology*. 1986. V. 8, No 6. P.597-605.
- Hoeppeener R., Kalthoff E., Schrader P.* Zur physikalischen Tectonik: Bruchbildung bei verschiedenen Deformationen im Experiment, *Geol. Rundsch.* 1969. V. 59. P. 179-193.
- Hubbert M.K., Rubey W.W.* Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting // *Bull. Geol. Soc. Am.* V. 70. P 1459-1520.
- Jaeger J.C.* Elasticity, fracture flow. London. 1962. 205 p.
- Keller E.A., Bonkowski M.S., Korsch R.J., Shlomon R.J.* Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone in the southern Indio Hills // *Coachella Valley., California: Geological Society of America Bulletin*. 1982. V. 93. P. 46-56.
- Lajtai E.Z.* A theoretical and experimental evaluation of the Griffith theory of brittle fracture // *Tectonophysics*. 1971. V. I, No 1. P. 129-156.
- Lajtai E.Z.* Mechanics of second order faults and tension gashes // *Bull. Geol. Soc. Am.* 1969. V. 80, N 11. P.2253-2272.
- Lamouroux C., Ingles J., Debat P.* Conjugate ductile shear zones // *Tectonophysics*. 1991. V. 185. P. 309-323.
- Mead W.J.* Notes of the mechanics of geologic structures // *J. Geol.* 1920. No 20. P. 505-525.
- Moor D.E., Lockner D.A.* The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite // *J. Struct. Geology*. 1995. V. 17, No 1. P. 95-114.
- Naylor M. A., Mandl G., Sijpesteijn C.H.K.* Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states // *J. Struct. Geol.* 1986. V. 8. P. 737-752.
- O'Bryan J.W., Cohen R., Gilliland W.N.* Experimental origin of transform faults and striates spreading-center segments // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1975. V. 86. P. 793-796.
- Oerte, G.* The mechanism of faulting in clay experiments // *Tectonophysics*. 1965. V. 2. P. 343-393.
- Peacock D.C.P.* Displacements and segment linkage in strike-slip fault zones // *J. Struct. Geology*. 1991. V.13, No 9. P.1025-1035.
- Qidong D., Peizhen Z.* Research on the geometry of shear fracture zones // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89, No B7. P. 5699-5710.
- Ramsay J.G., Huber M.J.* The techniques of modern structural geology. London: Academ. Press. Incorp. 1987. V. 1,2. 700 p.
- Ramsay J.G.* Shear zone geometry: a review // *J. Struct. Geol.* 1980. V. 2, No ½. P. 83-100.
- Redfield, T.F., Fitzgerald P.G.* The Denali fault system of southern Alaska: an interior strike-slip structure responding to dextral and sinistral shear coupling // *Tectonics*. 1993. V. 12, No 5. P. 1195-1280.
- Riedel W.* Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // *Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol.* Abt. B. 30. 1929. S. 354-368.

- Skempton A.W.* Some observations on tectonic shear zones // Proc. I-st Congr. Intern. Soc. Rock Mech. 1966. V. I. P. 329-335.
- Sylvester G.* Strike-slip faults // Geol. Soc. Am. Bull.. 1988. V. 100, No 31. P. 1666-1703.
- Tanner W.F.* Surface structural patterns obtained from strike-slip models // J. Geol. 1962. V. 70, No 1. P. 101-107.
- Tchalenko J.S.* The influence of shear and consolidation on the microscopic structure of some clays. Ph. D. Thesis. Lond. Univ. 1967.
- Tchalenko I.S.* The evolution of kink-bands and the development of compression textures in sheared clays // Tectonophysics. 1968. V. 6, No 2. P. 159-174.
- Tchalenko J.S.* Similarities between shear zones of different magnitudes // Geol. Soc. Bull. 1970. V. 81, No 6. P. 1625-1640.