СООТНОШЕНИЕ ХРУПКИХ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СЛОЕ НАД АКТИВНЫМИ РАЗЛОМАМИ ФУНДАМЕНТА (по результатам моделирования)

А.В. Михайлова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

В работе с помощью физического и математического моделирования описываются деформационные характеристики структуры раздвига, возникающей в деформируемом слое, расположенном над движущимися блоками более жёстких пород. Рассматриваемые результаты были получены тремя методами:

1) для начальной стадии процесса, когда деформации малы и нарушения сплошности отсутствуют – с помощью теоретических расчетов с использованием математического моделирования [Григорьев и др., 1987];

2) для стадий с развитыми деформациями и при наличии разрывов – посредством физического эксперимента, когда в моделях из эквивалентных материалов (бентонитовой глины) путём непосредственных измерений описывались характеристики деформации (их траектории и величины), поля перемещений (или их производных), и картина разрушения (трещины и разрывы со смещением);

3) с помощью численного моделирования в конечных элементах изучались деформации за пределом упругости.

Условия проведения теоретических и экспериментальных исследований по возможности были максимально приближены друг к другу и являлись по существу продолжением одно другого [Григорьев, Михайлова, 1985].Всего рассматривалось 11 механизмов формирования структур в слое над активными разломами в его основании. Тип механизма определяется углом падения сместителя θ и углом между направлением падения и вектором перемещения висячего крыла разлома γ [Михайлова, 2002, рис. 1, с. 215]. Для раздвига: θ=0 и γ=0.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическое моделирование проводилось в рамках линейной теории механики сплошной среды. Эксперимент осуществлялся с применением эквивалентного упруго-вязко-пластичного материала, бентонитовой глины влажностью около 50%. До предела текучести деформирование происходит по линейному закону, за пределом текучести вязкость падает и деформации возрастают нелинейно.

Таким образом, на ранней стадии деформирования в эксперименте существует интервал, где процесс протекает по тому же закону, что и при математическом моделировании. Это предопределило неплохое соответствие результатов теоретического решения с данными моделирования в начале деформационного процесса, когда деформации уже достигли значений, доступных для измерения (порядка 5–10%), а нарушения сплошности были незначительны. Дальнейшее развитие структур и процесс разрушения на следующих стадиях изучались только на физических моделях. Исследование пластических деформаций проводилось с помощью программы UWay, в рамках модели Мизеса. Критерии пластичности принимались соответствующими эквивалентному материалу эксперимента.

Математическое моделирование [Григорьев и др., 1987, 1989]. При математическом анализе рассматривался бесконечный горизонтальный слой постоянной мощности, лежащий на основании, состоящем из двух полубесконечных абсолютно жёстких блоков. Напряжённое состояние в слое вызывается поступательным движением блоков основания скользящих по разломам основания. Предполагается, что между деформируемым слоем и жёстким основанием имеет место слипание. Решение осуществлялось в рамках плоской деформации для структур, образующихся над разломами типа сброс, взброс, раздвиг и т.п., когда движение блоков происходит в вертикальной плоскости, и в рамках антиплоской деформации, при движении блоков в горизонтальной плоскости, как при продольном сдвиге. Для описания промежуточных типов, таких как сбросо-сдвиг, сдвиго-раздвиг и т.п., применялся метод наложения. Здесь рассматривается только структура раздвига. Все характеристики напряжений и перемещений приводились в безразмерный вид. Линейные размеры (в том числе координаты) относились к мощности слоя, скорости u и v горизонтального и вертикального смещений – к начальной скорости относительного движения блоков фундамен-

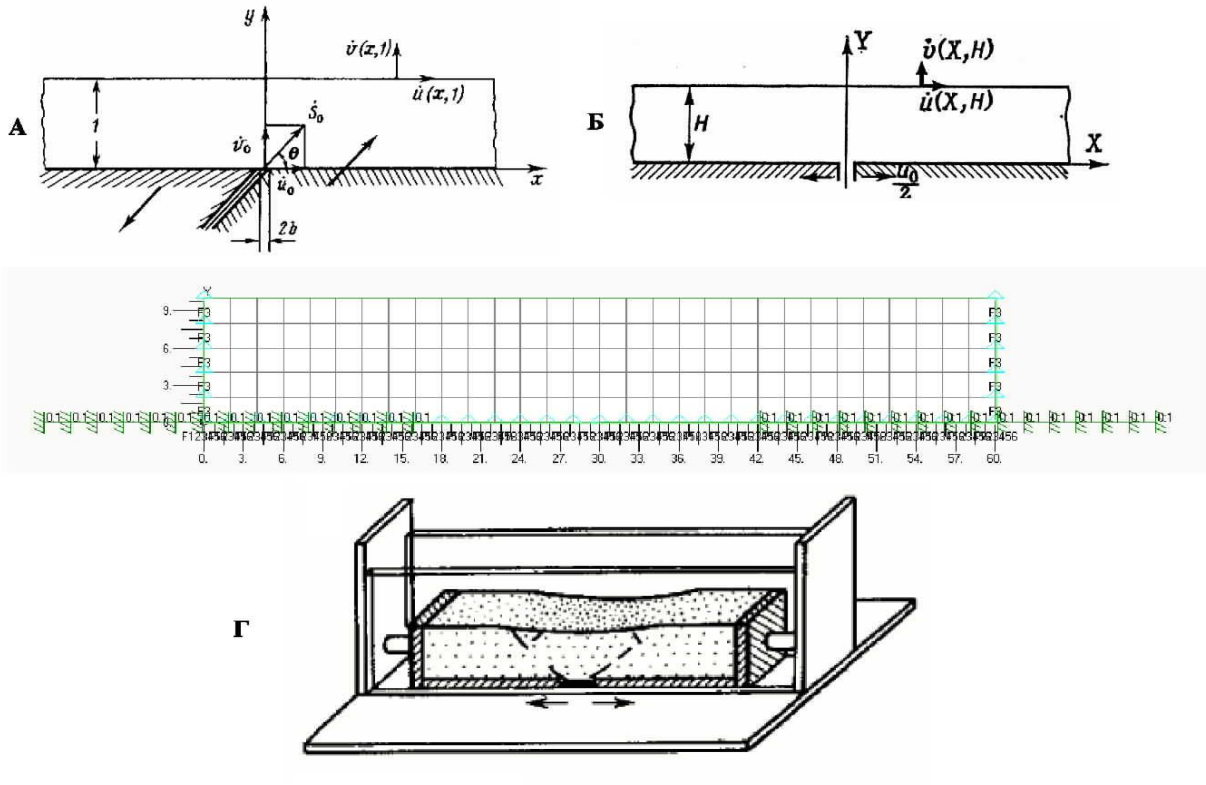

Рис. 1. Постановка задачи: А – математическое моделирование, общий случай; Б – то же, раздвиг; В – схема краевых условий к моделям в конечных элементах; Г – схема модели раздвига при физическом эксперименте

та V_0, а напряжения – к величине $4\eta V_0 / H$, где η – вязкость деформируемого материала, V_0 – постоянная с размерностью скорости, H – мощность деформируемого слоя.

Краевые условия для случая плоской задачи: (рис. 1: А – общий случай, Б – случай раздвига). $Y = 1$: $P_y = P_{xy} = 0$; (отсутствие напряжений на верхней границе) $Y = 0$: $u = 0, v = 0$ при $x > 0$; (отсутствие перемещений на подошве правой части слоя) $u = U_0$, $v = V_0$ при $x \le 0$, где U_0, V_0 – функции от x (движение с одинаковой скоростью подошвы левой части слоя). Приведённые условия нагружения рассмотрены для линейно-вязкого несжимаемого материала.

Физический эксперимент Слой эквивалентного материала [Михайлова, Осокина, 1973] укладывался на жёсткие блоки и был заключён между двумя стёклами, смазанными для уменьшения трения маслом (рис. 1, Г). Движение блоков осуществлялось с постоянной скоростью 1 мм/мин. Используемая бентонитовая глина имеет условный предел текучести τ_s~25 г/см^2. До этих напряжений зависимость $\tau - \eta$ (напряжения – вязкость) линейна. В этом интервале на линейном участке деформирования вязкость составляет $\eta=10^{10}$ пз. За пределом текучести вязкость резко падает и в интервале напряжений 30-50 г/см^2 составляет $\eta=10^8$-10^2 Пз. Именно в этом интервале при опыте можно было фиксировать деформации с принятой степенью точности. Одновременно следует отметить, что разрушение в этом материале происходит при напряжениях ~50 г/см^2.Для расчёта условий подобия использовались графики зависимости $\lg\eta = f(\tau)$: для осадочных пород III группы – по М.В. Гзовскому, Д.Н. Осокиной [Гзовский, 1975, рис. 4, с. 55], для эквивалентного материала – по Осокиной [Михайлова, Осокина, 1973, рис. 1, с. 590]. Так как график для пород имеет оценочный характер, то в самом первом приближении графики рассматривались как подобные, а коэффициенты условий подобия рассчитывались традиционным способом [Гзовский, 1975] по средним значениям η и τ: $C_\eta=10^{-15}$, $C_\tau=10^{-4}$, $C_l=10^{-4}$, $C_t=10^{-11}$, $C_v=10^7$. Используемые формулы: $\tau = \rho g H$ и $\tau = \eta\dot{\gamma}$ или $\tau = \eta / t$. Скорость движения блоков поддерживалась постоянной с помощью моторов с редукторами и соответствовала по условиям подобия платформенным скоростям. Вязкость материала при этих скоростях соотносилась с вязкостью пород осадочного чехла. Деформации и перемещения измерялись с помощью марок, нанесенных на грани модели перед началом опыта. [Михайлова, 1989].

Численное моделирование. Моделирование в конечных элементах привлекалось для изучения напряжённо-деформированного состояния за пределом упругости. Используемая программа UWay позволяет после окончания расчёта увидеть графики распределения всех компонент и главных значений напряжений, а также получить их описание в виде таблиц, что даёт дополнительные возможности для вычисления некоторых необходимых характеристик (например, коэффициента Лоде – Надаи и др.) Программа удобна, и в ряде случаев её использование дополняет и частично заменяет физический эксперимент. Например, возможно в модели выделять области с критическими значениями напряжений в пределах пластичности и прочности и тем самым определять зоны разрушения и пластического течения. Использование моделирования в конечных элементах для изучения роли пластических деформаций при подготовке разрушения показано на примере модели раздвига. На рис. 1, В отражены условия моделирования, показано направление и величина (0.1 см) раздвигания, а также закрепление вертикальных стенок по оси *Z* (З – отсутствие перемещений в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа) и закрепление дна модели: «фиксировано» (то есть отсутствие перемещений и вращения по всем трём направлениям – *X, Y, Z*). Здесь на примере структуры раздвига показаны возможности и результаты исследования тектонических структур с помощью моделирования с применением комплекса различных методов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее наглядным является физическое моделирование, но измерения на моделях возможны лишь при деформациях за пределом пластичности, когда деформации достигли величины не меньшей 5%. Поэтому начальную стадию формирования структуры целесообразно исследовать математически. Приведённые здесь результаты математических расчётов относятся к начальному моменту движения блоков. Оказывается, что именно в этот момент закладываются основные характерные черты структуры. В дальнейшем её развитие происходит практически унаследовано.

Основные характеристики, полученные аналитическим путём показаны на рис. 2. Здесь на рис. 2, Б – траектории напряжений, рассчитанные на начальный момент движения блоков, в сопоставлении с траекториями деформаций, полученными на двух более поздних стадиях развития структуры и построенными на основе эксперимента. Сравнивая их, можно заметить, что ориентация траекторий деформаций на более поздних стадиях развития структур близка к траекториям соответствующих напряжений в начальный момент деформирования. Речь идёт об общем их подобии, так как в силу недостаточности количества точек опроса данные эксперимента менее детализированы. Характерны расположение зон трещиноватости и тенденция развития сквозных разрывов в деформируемом слое по отношению к месту выхода разлома в основание этого слоя (рис. 2 и 3).

На рис. 2, А показан предварительный расчёт расположения областей разрушения различных типов – сколовых и отрывных, а также областей «запрета» разрушению. Как показал физический эксперимент, фактическое разрушение модели подтвердило данные расчёта. Зарождение первых трещин происходит буквально с момента первых подвижек блоков основания в очень ограниченной зоне концентрации напряжений, непосредственно над щелью, разделяющей два движущихся блока в области расчётных предельных значений главных нормальных максимальных напряжений. Сколы развиваются снизу вверх в двух областях, расходящихся в обе стороны от щели между раздвигающимися блоками. Эти области имеют устойчивые границы, также согласующиеся с расчётными. Образование трещин и сквозных разрывов происходит внутри этих границ, не распространяясь за их пределы; развитие зоны заключается во все большем увеличении раздробленности в ее пределах и практически прекращается после того, как сквозные разрывы достигнут поверхности и как бы выделят рассматриваемую область из общего массива модели (схемы и фотография рис. 3). Сквозные разрывы образуются в результате объединения отдельных трещин или их частей с разрушением перемычек между ними.

Одновременно с разрушениями, вызванными собственно подвижками основания и развивающимися от подошвы слоя к поверхности, происходит зарождение довольно крупных разрывов у поверхности, проникающих в слой сверху вниз в результате изгибания деформируемой толщи. На более поздних стадиях формирования структуры эти две области разрушения сливаются. Расположение и конфигурация областей разрушения находятся, как говорилось выше, в соответствии с полем напряжений и деформаций в самой начальной стадии, для которой были произведены расче-

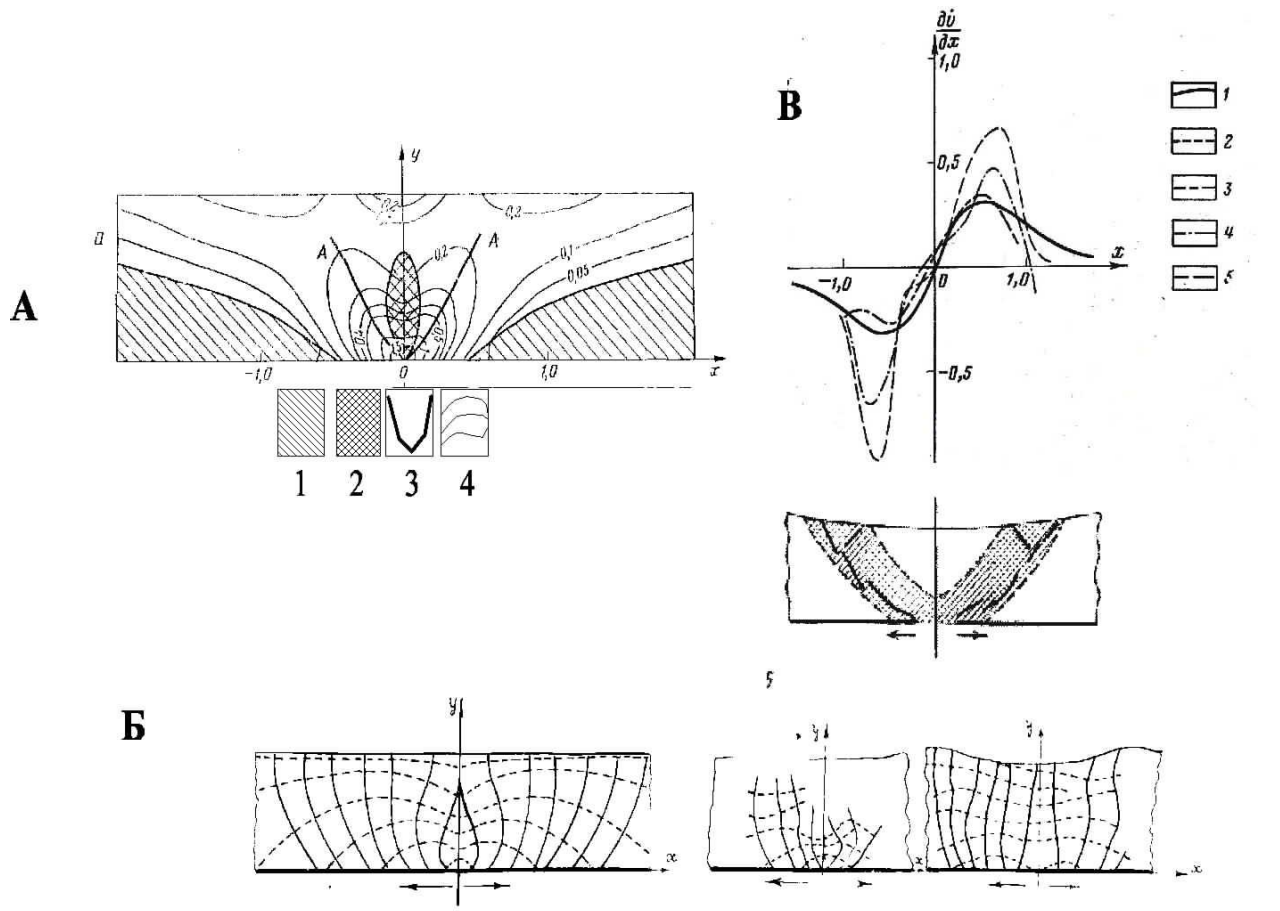

Рис. 2. Некоторые характеристики структуры раздвига, полученные в результате физического моделирования и математического расчёта.
А – Эквивалентные напряжения, ответственные за разрушение: 1 – область «запрета» образованию разрывов; 2 – область возникновения отрывов; 3 – область формирования сколов; 4 – изолинии безразмерных эквивалентных напряжений. Б – Траектории теоретических главных нормальных напряжений (первый график) и экспериментальных деформаций (2-й и 3-й графики): пунктирные – растяжения, сплошные – сжатия. В – Графики градиентов скоростей вертикальных перемещений поверхности (1 – расчётная кривая, 2–4 – экспериментальные) над структурой раздвигания

ты эквивалентных напряжений, ответственных за разрушение, в соответствии с теорией Кулона – Мора. На рис. 2, А показаны области разрушения, определённые этим расчётом, они находятся в хорошем соответствии с данными эксперимента (рис. 3).

В лаборатории тектонофизики ИФЗ в своё время были проведены исследования для интерпретации современных движений, опирающейся на связи кинематических характеристик поверхности слоя с напряженным состоянием и зонами нарушений сплошности на глубине. Теоретические решения конкретизировали эти связи, установив возможности определения положения выхода разлома под подошву слоя и ориентации плоскости разлома на основе анализа кинематики поверхности слоя: поля вертикальных скоростей и их градиентов. Решение задачи о напряженном состоянии слоя позволило судить о расположении зон повышенных напряжений, отвечающих различным механизмам деформирования по отношению к месту выхода разлома под подошву.

Данные эксперимента позволили наметить связи между указанными зонами и областями нарушений сплошности в моделях. На основании обработки результатов опытов были построены графики безразмерных вертикальных скоростей поверхности и их градиентов. Для градиентов на рис. 2, В приведены три кривых, отвечающих трем последовательным стадиям эксперимента, а также кривая, отвечающая теоретическому решению. Как видно из этого рисунка, сопоставляемые кривые достаточно близки и, что особенно важно, на всех кривых наблюдается практически одинаковое по отношению к разлому расположение характерных точек – экстремумов и перегиба. Точка перегиба располагается непосредственно над выходом разлома основания в деформируемый слой. Это характерно только для раздвига, для других механизмов расположение, естественно, иное [Grigoryev et al., 1988].

Сопоставление эксперимента и численного моделирования позволяет проследить течение деформационного процесса с физической точки зрения.

При моделировании на эквивалентных материалах после некоторого «обжатия» модели и небольшого последующего нагружения очень быстро достигается предел пластичности,

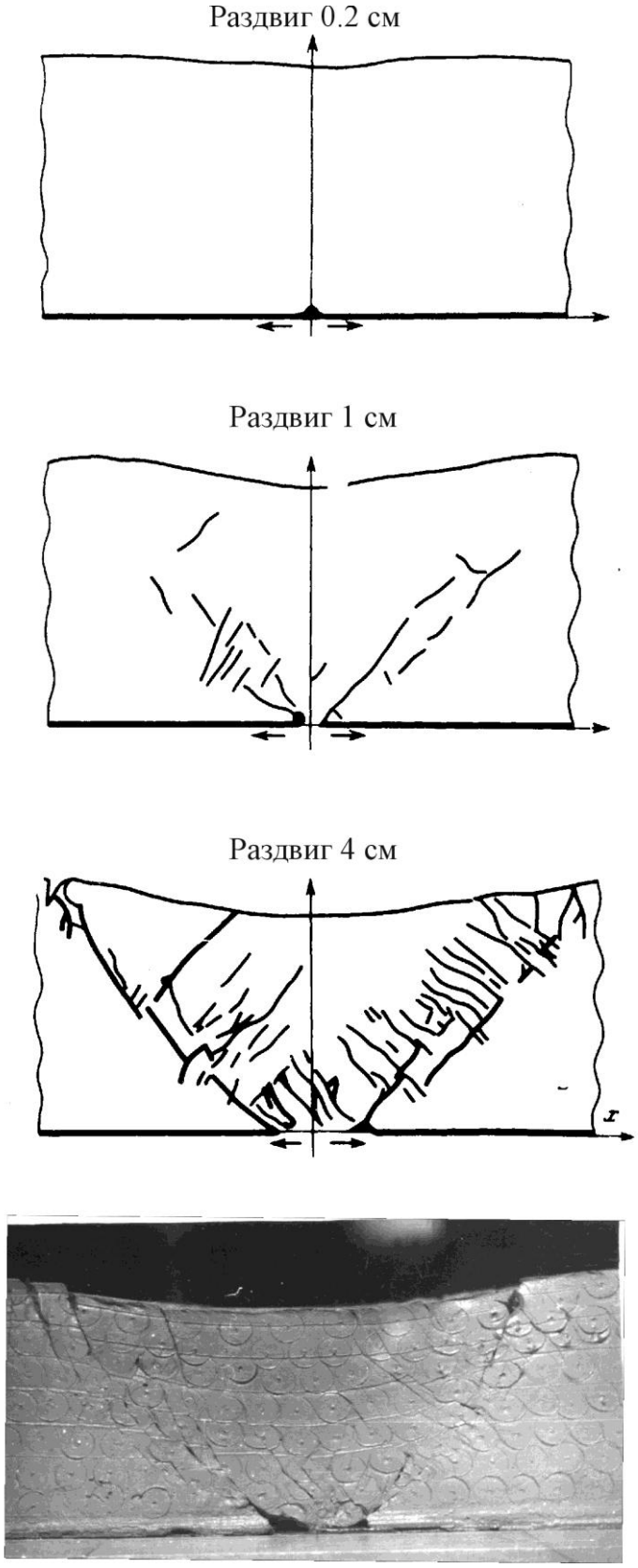

Рис. 3. Схемы разрушения структуры раздвига на разных стадиях развития, фотография соответствует последней стадии (по результатам эксперимента).

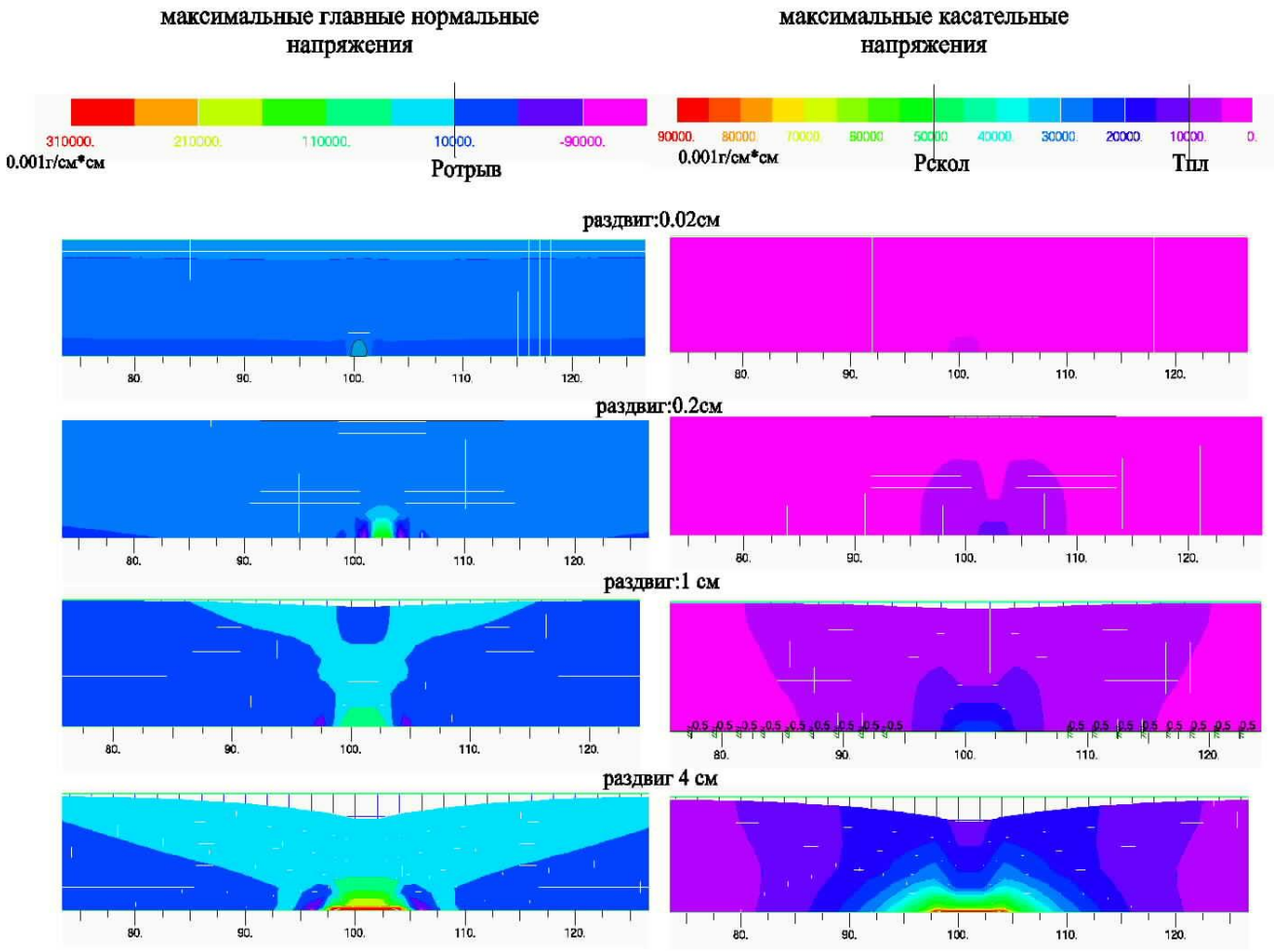

Рис. 4. Максимальные главные нормальные и касательные напряжения на разных стадиях подготовки и развития структуры разрушения раздвига по результатам численного моделирования (объяснения в тексте)

о чём говорит необратимое деформирование с фиксированными во время опыта величинами от 5–10%. Предел пластичности для бентонитовых глин, применяемых нами, по данным С.С. Стоянова составляет 8 г/см^2 [Стоянов, 1977], по данным Осокиной – 25 г/см^2 [Михайлова, Осокина, 1973]. Для численного моделирования принято 8 г/см^2, так как данные Осокиной получены косвенным путём.

Численное моделирование показывает, что при раздвигании блоков основания на 0.02 см над точкой, где разделяются блоки основания, уже возникают условия для пластического течения. Здесь, как видно из рисунка 4, максимальные касательные напряжения достигают величины предела пластичности (~8 г/см^2). В этой же ограниченной области величина максимальных главных нормальных напряжений соответствует пределу прочности на отрыв ($P_{отрыва}$), который для нашего материала составляет примерно 1/6–1/10 прочности на скол: ($P_{скола}$ =~ 50 г/см^2 по данным Осокиной), то есть $P_{отрыва}$=~5–10 г/см^2. В этом месте происходит резкое увеличение деформаций в локализованном объёме очень малой величины относительно размера всей модели и практически сразу возникает отрыв небольшой протяжённости (рис. 4). В ходе дальнейшего нагружения область остаточных деформаций расширяется по мере раздвигания блоков основания. При дальнейшем нагружении область остаточных деформаций расширяется по мере раздвигания блоков основания. При раздвигании на величину 0.2 см область пластических деформаций увеличивается, это видно на графике максимальных касательных напряжений (рис. 4). Одновременно расширяется область максимальных главных нормальных напряжений, превышающих предел прочности на отрыв, но касательные напряжения ещё не достигают предела прочности на скол. На физической модели на этой стадии уже заметно появление отрывной трещины у основания модели (возникает небольшое зияние – рис. 3).

При раздвигании блоков основания на 1 см

нормальные напряжения, превышающие предел прочности, распространяются до поверхности, область их влияния раздваивается, стимулируя, очевидно, зарождение трещин, развивающихся с поверхности. Область пластического течения также расширяется почти до середины мощности, и хотя касательные напряжения ещё не достигли предельных «разрушающих» величин, как показывает численное моделирование мы видим, что на модели при таком раздвигании зарождаются две группы сколов (рис. 3). Вероятно, обстановка растяжения в реальной модели создаёт условия для снижения предела прочности на скол. Кроме того, реальное поле напряжений более неравномерно из-за концентрации напряжений у концов возникающих разрывов, что позволяет предполагать наличие условий для более раннего, по сравнению с теоретическими предпосылками, возникновения и развития разрушений. Картина разрушения на модели на этой стадии уже вполне характерна для раздвига: две группы сколов, прорастающие снизу вверх, окончательно формируются. Они охватывают область модели вокруг максимума у подошвы слоя на половину мощности слоя и распространяются в обе стороны примерно на такое же расстояние.

На следующей стадии при раздвигании на 4 см, то есть примерно на треть мощности модели, пластические деформации захватывают модель на всю мощность слоя, «отрывные» напряжения также распространяются до поверхности, сколовые разрушающие напряжения (даже в «ненарушенной» математической модели) также захватывают большую область от подошвы до трети мощности модели. На схеме физической модели и на фотографии этой стадии (см. рис. 3) различаются две хорошо проработанные области сколов типа сбросов, среди которых могут быть и отрывы той же ориентации, что и сбросы. Область разрушения образует два «крыла» простирающиеся в обе стороны согласно с областями максимальных значений напряжений в границах их критических величин.

Сочетание в исследовании трёх типов моделирования позволяет рассмотреть процесс формирования структур от упругих деформаций до разрушения. Решение аналитической задачи в упругой постановке показывает, что основные черты структуры закладываются на самой ранней стадии деформирования и могут быть определены с помощью математического аналитического расчёта. Границы остаточных деформаций выявляются при численном моделировании в конечных элементах, а разрушение наблюдается с помощью эксперимента.

Данные трёх типов моделирования позволили на примере структуры «раздвига» при сопоставлении областей разрушения на физических моделях с результатами аналитического расчёта эквивалентных, ответственных за разрушение (в рамках теории Кулона – Мора) напряжений, и данными об областях пластических деформаций, полученных в результате численного моделирования в конечных элементах, проследить последовательность деформаций и разрушения в процессе формирования структуры, подобной природным тектоническим.

Таким образом, теоретические расчёты дают возможность вычислять напряжения, определять границы определённых типов разрушения и некоторые характеристики перемещений (например, градиенты вертикальных перемещений поверхности) на стадии упругого деформирования, когда точность измерений в физических опытах слишком низкая. Эксперимент представляет картину разрушения, деформации и перемещения на развитой стадии формирования структур.

Численное моделирование в конечных элементах позволяет выделять области разрушения, изучать процесс формирования структур как при упругом, так и при пластическом деформировании, выявлять роль массовых сил веса, используя при этом данные о свойствах модельного материала, что позволяет сопоставлять результаты с данными эксперимента или производить расчёты непосредственно с характеристиками природных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.

Григорьев А.С., Волович И.М., Михайлова А.В., Ребецкий Ю.Л., Шахмурадова З.Е. Исследование напряженного состояния, кинематики и развития нарушений сплошности осадочного чехла над активными разломами фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 5–31.

Григорьев А.С., Волович И.М., Ребецкий Ю.Л. Задача о кинематике и напряжённом состоянии слоя при смешанных краевых условиях в связи с интерпретацией современных движений в платформенных областях // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1989. № 7. С. 38–54.

Григорьев А.С., Михайлова А.В. Сочетание теоретического и экспериментального методов при исследовании процессов образования тектони-

ческих структур // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука. 1985. С. 131–147.

Михайлова А.В. Методические вопросы создания и исследования тектонических моделей с применением пластичных эквивалентных материалов // Экспериментальная тектоника. Методы, результаты, перспективы. М.: Наука. 1989. С. 209–228.

Михайлова А.В. Исследование механизмов формирования тектонических структур в слое над активными разломами фундамента в свете учения М.В. Гзовского (по результатам моделирования) // Тектонофизика сегодня. М.: Изд. ОИФЗ РАН. 2002. С. 212–224.

Михайлова А.В., Осокина Д.Н. Изучение соотношений между характеристиками вертикальных перемещений поверхности и величиной деформаций на глубине (на моделях) // Современные движения земной коры. № 5. Тарту: 1973. С. 589–594.

Ребецкий Ю.Л. Напряжённое состояние слоя при продольном сдвиге // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1988. № 9. С. 29–35.

Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука 1987. С. 41–57.

Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра. 1977. 144 с.

Grigoryev A.S., Volovich I.M., Mikhailova A.V., Rebetsky Yu.L. and Shakhmuradova Z.E. Relationships between the kinematics of the top of a layer and the state of stress within it due to block motion at its bottom// Journal of Geodinamics. 1988. № 10 P. 127–138.