

Численное исследование деформации слоя геосреды при разрывном сдвиговом смещении основания*

Ю.П. СТЕФАНОВ, Р.А. БАКЕЕВ

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

e-mail: stefanov@ispms.tsc.ru

Представлены результаты 2D и 3D моделирования процесса деформации слоя геосреды в условиях разрывного горизонтального сдвига основания. Рассмотрены закономерности формирования полос локализованного сдвига. Выполнено сопоставление результатов трехмерного моделирования и оценок, полученных в рамках двумерного рассмотрения с имитацией трехмерных условий.

Введение. Важное место при исследовании деформационных процессов в земной коре занимает изучение закономерностей формирования и развития зон нарушений, разломов и их связи с глубиной, в соответствии с изменением напряженного состояния и свойств среды. К числу таких вопросов относится объяснение причин и условий формирования конкретных деформационных структур на земной поверхности. Для ответа на этот вопрос необходимо понимание того, как процессы деформации, протекающие на той, или иной глубине отражаются на дневной поверхности.

Изучение процессов деформации на различных глубинах, даже там, где это осуществимо, чрезвычайно сложная и затратная задача. Поэтому, наряду с экспериментальными методами, большое значение имеет математическое моделирование поведения геосреды в различных условиях. Такие исследования, несмотря на, нередко, модельный характер, позволяют получить необходимые оценки влияния тех, или иных факторов на процесс деформации и выполнить проверку гипотез о протекающих процессах.

В ряду задач о развитии деформации в верхних слоях земной коры особое место занимают процессы формирования нарушений в осадочном чехле, связанные с разрывным горизонтальным сдвигом более жесткого основания. Данная задача имеет большое научное и прикладное значение. Численное моделирование такого процесса предполагает решение трех-мерной задачи. Учитывая, что трехмерное моделирование упругопластического деформирования и разрушения геологической среды достаточно сложная задача, возникает желание ее упростить и свести к набору двумерных. В связи с этим, в работе выполнено сопоставление результатов трехмерного моделирования и оценок, полученных в рамках двумерного рассмотрения

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о деформировании слоя среды при разрывном сдвиговом смещении фундамента, рис. 1 (а). Примем, что перемещения во всей толще вдоль оси X отсутствуют. Среда находится под действием гравитационных сил. В соответствии с заданной глубиной и свойствами среды (плотностью

*Работа выполнена при поддержке РФФИ № 11-05-00661-а, интеграционным проектом СО РАН № 114, проектом 16.8 Президиума РАН и проектом VII.64.1.8 фундаментальных исследований СО РАН на 2010-2012 гг.

вышележащих слоев) напряжения, обусловленные действием силы, тяжести будут:

$$\sigma_z(z) = g \int_0^z \rho(z) dz, \quad \sigma_x(z) = \sigma_y(z) = \sigma_z(z) \frac{\nu}{1 - \nu},$$

где ν – коэффициент Пуассона. Моделирование процесса деформации в трехмерной постановке может быть выполнено без дополнительных предположений.

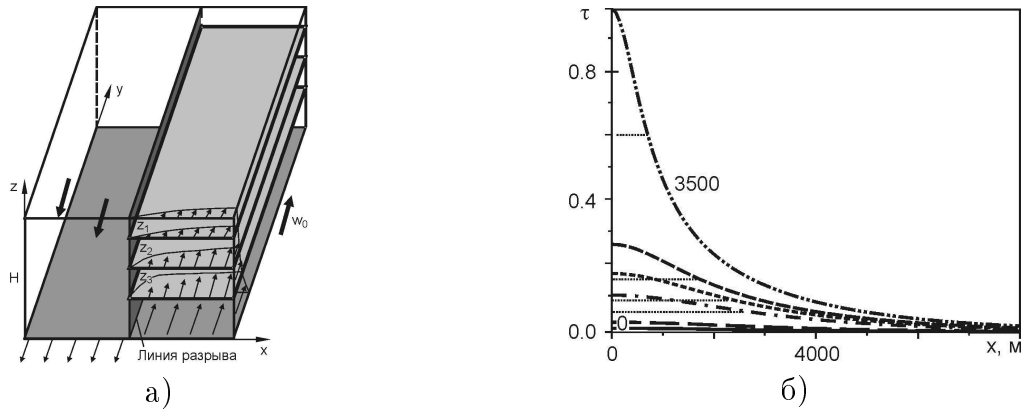


Рис. 1. Схема деформирования слоя среды и условия нагружения горизонтальных сечений (а) и распределение касательных напряжений на различных глубинах в упругой среде (б).

Для моделирования поведения среды в двумерной постановке необходимо задание условий нагружения в каждом из сечений, которые приближенно соответствуют условиям, действующим в объемной среде. В вертикальной плоскости перпендикулярной оси смещения данная задача соответствует условиям антиплоского сдвига. Напряженное состояние в толще среды, на упругой стадии деформирования, при указанных условиях, можно описать с использованием решения, полученного Ю.Л. Ребецким [1] (рис. 1 (б)):

$$\sigma_{xy} = a \frac{\sin(\pi z/2H) \operatorname{ch}(\pi x/2H)}{\operatorname{ch}(\pi x/H) - \cos(\pi z/H)}, \quad \sigma_{zy} = -a \frac{\cos(\pi z/2H) \operatorname{sh}(\pi x/2H)}{\operatorname{ch}(\pi x/H) - \cos(\pi z/H)},$$

где $a = \mu w_0/H$, H – толщина слоя (глубина основания), μ – модуль сдвига, w_0 – относительная амплитуда смещения основания в направлении оси y .

Для двумерного моделирования упругопластического деформирования нагрузка в каждом из слоев задавалась, на основании имеющегося решения упругой задачи. С этой целью рассчитывалось распределение массовых сил, имитирующих объемное нагружение: $F_y(x, z) = \sigma_{xy}(x, z)_{,x}$ и $F_y(x, z) = \tau_{max}(x, z)_{,x}$. Такая нагрузка обеспечила на упругой стадии деформирования соответствие, полученных численных расчетов двумерной задачи, аналитическому решению (рис. 2 (б)) [2]. Предполагалось, что модули упругости, плотность и прочность среды возрастают с глубиной, табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры среды

$\rho, \text{г/см}^3$	$K, \text{Гпа}$	$\mu, \text{Гпа}$	$Y, \text{Мпа}$	α	Λ	$H, \text{м}$
1.8–2.65	4–25	1–15	5–35	0.65	0.16	4000

Для моделирования процесса деформации геосреды использован подход [3], который основан на решении уравнений динамики упругопластической

среды по явной численной схеме [4]. Описание деформации среды за пределом упругости осуществлялось в рамках модифицированной модели Друккера-Прагера-Николаевского [5,6]. Процессы деформирования рассматривались в трехмерной и двумерной постановке для условий плоской деформации.

Основные уравнения. Система уравнений, использованная для описания процессов деформации включает уравнения неразрывности

$$\dot{\rho} + \rho u_{i,i} = 0$$

и уравнения движения

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \dot{u}_i.$$

Здесь ρ – плотность материала, u_i – компоненты вектора скорости, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши, F_i – массовые силы; точка сверху означает производную по времени, индекс после запятой означает производную по соответствующей координате.

Система уравнений замыкается определяющими соотношениями, которые конкретизируют поведение среды при деформировании. Примем, что скорость деформации состоит из упругой и пластической частей:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p.$$

До начала пластической деформации напряжения определяются гипотетическим законом:

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} \right), \quad \frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik} \dot{\omega}_{jk} - s_{jk} \dot{\omega}_{ik}, \quad \dot{\sigma} = -K \frac{\dot{V}}{V},$$

где K и μ – модули сжатия и сдвига соответственно. При записи определяющих соотношений используется разложение тензора напряжений на шаровую и девиаторную части: $\sigma_{ij} = -\sigma \delta_{ij} + s_{ij}$, где $\sigma = -\sigma_{kk}/3$ – среднее давление; s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений, δ_{ij} – символ Кронекера. Здесь использована коротационная производная Яумана, которая учитывает возможность поворота элементов среды как целого. Компоненты тензора скорости деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и компоненты тензора скоростей вращения $\dot{\omega}_{ij}$ определяются из соотношений:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}).$$

Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния, при достижении которого начинается процесс неупругого, пластического деформирования, или разрушения. Пластическая деформация определяется в соответствии с уравнением предельной поверхности и пластическим потенциалом:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}},$$

где f – уравнение поверхности (функции) нагружения, g – пластический потенциал, ε_{ij}^p – компоненты пластической (неупругой) деформации. В качестве условия пластичности применяется условие Мизеса-Шлейхера в виде:

$$\tau - \alpha \sigma = Y,$$

где α – коэффициент внутреннего трения, Y – сдвиговая прочность материала, или сцепление, $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$. Пластический потенциал для расчета приращений пластической деформации, можно записать в виде:

$$g(\sigma, \tau) = \tau - \Lambda\sigma,$$

Λ – коэффициент дилатансии. Предельная поверхность изменяется в ходе деформирования. Упрочнение среды будем описывать соотношением:

$$Y(\gamma^p) = Y_0 [1 + h(A(\gamma^p) - D(\gamma^p))],$$

где h – коэффициент упрочнения, $d\gamma^p = 2((de_{ij})^p(de_{ij})^p/2)^{1/2}$ – интенсивность сдвиговой пластической деформации, $e_{ij}^p = \varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}^p\delta_{ij}$. Для учета упрочнения используется линейная зависимость $A(\gamma^p) = 2\gamma^p/\gamma^*$ и квадратичная – для учета разупрочнения (накопления повреждений) – $D(\gamma^p) = (\gamma^p/\gamma^*)^2$ где γ^* – критическая деформация, после достижения которой преобладает деградация материала.

Результаты расчетов. В условиях сдвиговой деформации в геосреде, как правило, возникает сеть полос локализованного сдвига Риделя [7-9]. Деформационная картина такого вида наблюдается на поверхности обнажений, вдоль линий разрывов и внутри разломных зон.

На упругой стадии деформирования по мере приближения к неподвижной границе, соответствующей плоскости симметрии, имеет место рост напряжений (рис. 1, (б)). В результате при рассмотрении упругопластической среды в двумерной постановке вдоль этой границы локализуется пластическая деформация. С увеличением амплитуды нагрузки, которая могла бы вызвать пластическую деформацию в более широкой области среды, большие деформации на линии локализации приводят к невозможности продолжения расчетов. Очевидно, что в процессе пластического деформирования, которое имеет место в реальной ситуации, интенсивность сдвиговых напряжений ограничена сдвиговой прочностью среды. Поэтому для проведения расчетов значение нагрузки ограничивалось некоторым уровнем (0.6 от максимального значения), где напряжения принимались постоянными. Соответственно в данной зоне имитирующие нагрузку силы Fy принимали нулевые значения. Такой шаг позволил выполнить серию расчетов для разных глубин и получить распределение полос локализованного сдвига.

На рис. 2 приведены картины деформирования для разных глубин, полученные в рамках двумерного рассмотрения. Расчеты осуществлялись с учетом симметрии для области размером 160×16 км. Для наглядности приведенные рисунки соответствуют полной геометрии, а краевые области слева и справа были обрезаны. Хорошо видно, что с ростом глубины сужается зона локализованной деформации [2], что обусловлено характером распределения нагрузки. Чем больше глубина, тем уже зона, где нагрузка имела постоянное наибольшее значение. На глубине, соответствующей основанию пластическая зона вырождается в линию разрыва. В связи с тем, что усечение величины нагрузки осуществлялось с определенным произволом, ширина области охваченной пластической деформацией определяется с тем же допущением. Можно говорить лишь о качественном характере изменения ширины пластической зоны с глубиной.

В отличие от 2D расчетов 3D моделирование не требует дополнительных предположений о характере деформации. На рис. 3, где представлены результаты трехмерных расчетов, видно, что ширина области, в которой развиваются полосы локализованной деформации, изменяется с глубиной несколько иначе. Вблизи

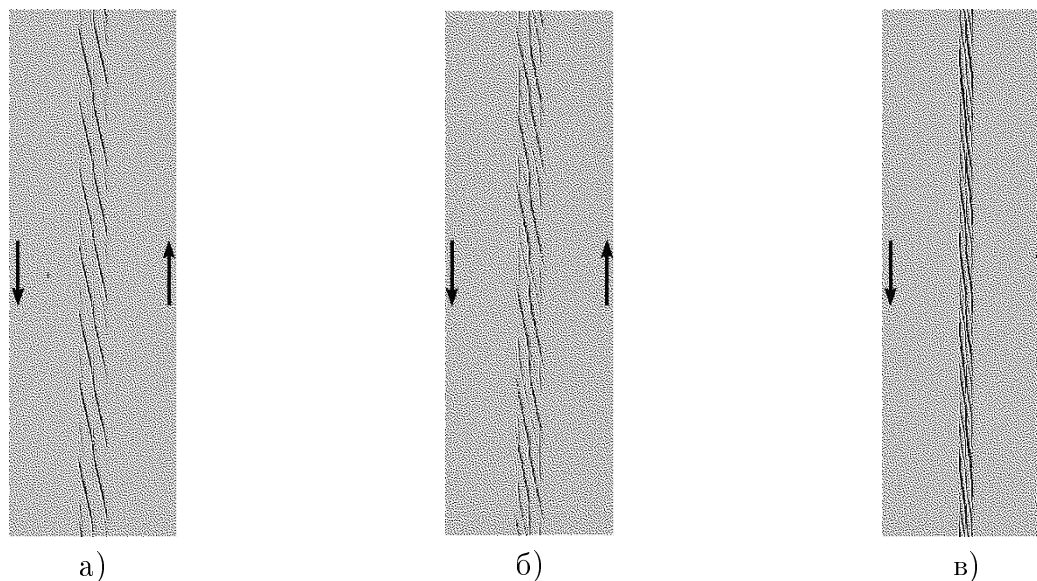


Рис. 2. Полосы локализованного сдвига в горизонтальных сечениях на глубинах: а) 1000 м, б) 2000 м, в) 3000 м при двумерных расчетах.

основания происходит быстрое расширение зоны локализации, тогда как в средней и верхней частях слоя эта ширина меняется мало. Кроме того, интенсивность сдвиговой деформации в нижних слоях значительно выше, чем вблизи поверхности. Можно увидеть, что с глубиной несколько меняется угол наклона полос локализации.

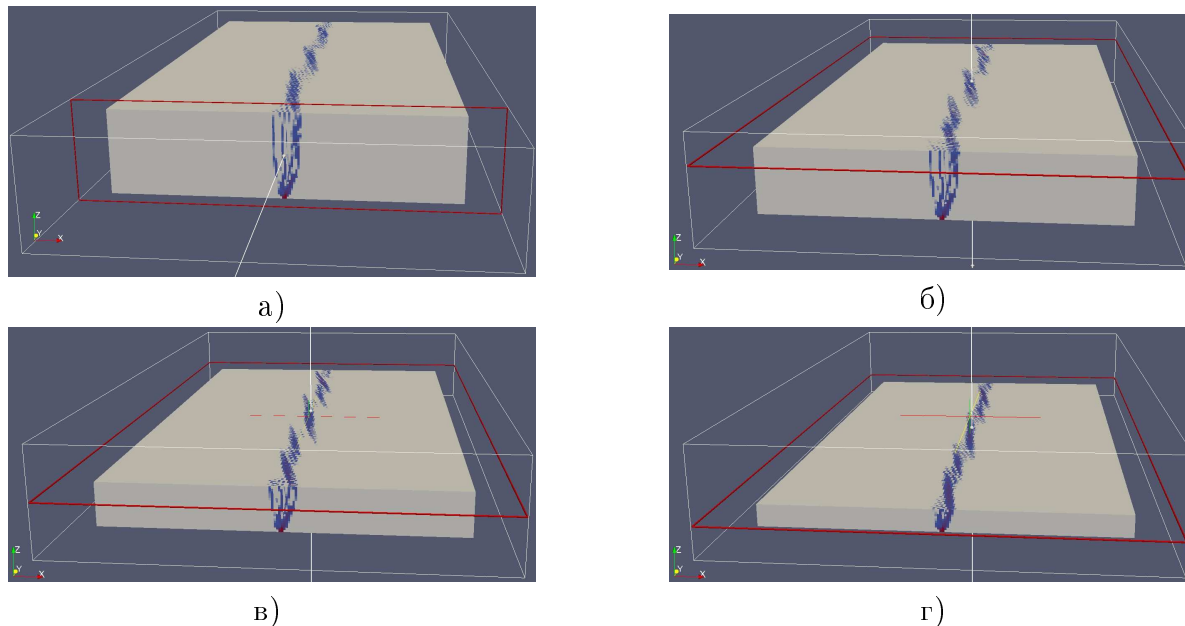


Рис. 3. Распределение интенсивности пластической деформации. Горизонтальные сечения на различных глубинах: а) 200 м, б) 1000 м, в) 2000 м, г) 3000 м.

Выполненные ранее исследования влияния изменения эффективной прочности материала на формирование полос локализации показали, что рост эффективной прочности приводит к увеличению расстояния между полосами локализованного сдвига [2]. Соответственно, с ростом глубины должна сохраняться такая закономерность ввиду

увеличения сдвиговой прочности, кроме того, с ростом давления возрастает внутреннее трение. Однако 3D моделирование не показало такой особенности, что связано с тем, что наибольшая интенсивность деформации наблюдается в полосах локализации развивающихся с глубины. Интенсивность деформации в полосах, зародившихся на поверхности, существенно меньше и на фоне глубинных такие полосы становятся малозаметными.

Заключение. Выполненные расчеты показали, что для построения целостной картины распределения напряженно-деформированного состояния, особенно если это касается процессов локализации деформации и разрушения, необходимо трехмерное моделирование. К сожалению, рассмотрение изолированных двумерных сечений среды не позволяет построить полную картину развития деформации, в частности, проследить развитие полос локализованной деформации. Кроме того, необходимо учитывать, что развитие разрушения, полос локализованного сдвига или трещин происходит поэтапно с изменением напряженного состояния в окрестности. Даже в случае правдоподобной картины деформации следует помнить о том, что дополнительное упрощение задачи, связанное со сведением ее к двумерной базируется на определенных допущениях, которые не могут полностью соблюдаться.

В то же время, для получения общих представлений и первичных оценок о характере процесса могут быть полезными двумерные расчеты. Такие оценки оказываются наиболее верными вблизи источника деформации, который в значительной мере определяет процесс деформации.

Список литературы

- [1] РЕБЕЦКИЙ Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном сдвиге // Изв. АН СССР. Физика Земли. - 1988. - №9. - С. 29-35.
- [2] СТЕФАНОВ Ю.П., БАКЕЕВ Р.А., СМОЛИН И.Ю. О закономерностях деформирования горизонтальных слоев среды при разрывном сдвиговом смещении основания // Физ. мезомех. - 2009. - Т. 12. - №1. - С. 83-89.
- [3] СТЕФАНОВ Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. - 2005. - Т. 8. - №3. - С. 129-142.
- [4] WILKINS M.L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. - Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1999. - 246 p.
- [5] ДРУККЕР Д., ПРАГЕР В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. - М.: Мир, 1975. - С. 166-177.
- [6] НИКОЛАЕВСКИЙ В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // ПММ. - 1971. - Т. 35. - Вып. 6. - С. 1017-1029.
- [7] ГОГОНЕНКОВ Г.Н., ТИМУРЗИЕВ А.И. Сдвиговые деформации в чехле западно-сибирской плиты и их роль при разведке месторождений нефти и газа // Геология нефти и газа. - 2010. - Т. 51. - №3. - С. 384-400.
- [8] ШЕРМАН С.И., СЕМИНСКИЙ К.Ж., БОРНЯКОВ С.А. и др. Разломообразование в литосфере. В 3-х томах. Новосибирск: Наука СО. 1991. - 261 с., 1992. - 262 с., 1994. - 263 с.
- [9] KATZ Y., WEINBERGER R., AYDIN A. Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah // J. Struct. Geol. - 2004. - V. 26. - P. 491-501.