



Ю. П. Стефанов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник (Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Россия, г. Томск, инженер (Национальный исследовательский Томский политехнический университет, stefanov@ispms.tsc.ru),

Р. А. Бакеев, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник (Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Россия, г. Томск, rustam@ispms.tsc.ru),

Г. Н. Гогоненков, д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора, gogo@cge.ru,

А. И. Тимурзиев, д-р геол.-минерал. наук, заместитель главного геофизика, aitimurziev@cge.ru,

(Открытое акционерное общество “Центральная геофизическая экспедиция”, Россия, г. Москва)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАРУШЕНИЙ В ОСАДОЧНОМ СЛОЕ ПРИ СДВИГЕ БЛОКОВ ФУНДАМЕНТА

В 3D постановке выполнено численное моделирование формирования нарушений в осадочном слое при горизонтальном сдвиге блоков фундамента. Рассмотрены особенности строения зон локализации деформации на разных этапах развития – от зарождения до формирования развитой картины нарушений. Показано, что в зависимости от упругих и прочностных свойств, а также толщины слоя возможно формирование “цветковых” структур принципиально различного строения.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, локализация деформации, нарушения, полосы Риделя, “цветковые” структуры, 3D численное моделирование, определяющие соотношения, сдвиговая деформация.

Введение

Многие месторождения углеводородов и других полезных ископаемых сосредоточены в зонах сдвиговых нарушений осадочного чехла. Это обусловлено тем, что зоны нарушений являются естественными областями миграции углеводородов в связи с повышенной пористостью и трещиноватостью, а также специфическим напряженно-деформированным состоянием. Внедрение технологий 3D сейсморазведки позволило достаточно надежно идентифицировать структуры нарушений, характерные для горизонтального сдвига фундамента [1, 10]. В связи со специ-

фической формой развития, расширяющейся вверх, деформации нарушения подобного типа называют “цветковыми” структурами горизонтального сдвига [1, 10–12]. Форма этих нарушений имеет сложный пространственный вид, что затрудняет проектирование и разработку таких месторождений. Поэтому в настоящее время особое внимание сосредоточено на изучении геометрии и напряженного состояния структур горизонтального сдвига или “цветковых” структур нарушений, формирование которых обусловлено разрывным горизонтальным сдвигом блоков фундамента [1, 4–7, 10–12].

Кинематические схемы деформирования, построенные на основе натуральных и экспериментальных данных, служат отправной точкой для теоретических исследований и задания граничных условий при проведении расчетов. Для успешного решения данной проблемы необходимо понимание общих закономерностей строения таких коллекторов, также знание о распределении напряженно-деформированного состояния в их окрестности с учетом влияния прочностных свойств осадочной толщи и условий нагружения, действующих в его окрестности. Чтобы приблизиться к пониманию природы и особенностей строения зон нарушений большое значение имеют аналитические решения [4, 5], которые позволяют оценить условия перехода в неупругое состояние и возможную ориентацию разрывов. Однако для построения полной картины деформации и структуры сдвиговых зон необходимы численные эксперименты, позволяющие проследить все стадии развития деформации и образования нарушений [6, 7]. На современном этапе решение данной задачи может быть получено на основе современных методов и подходов численного моделирования деформаци-

онных процессов геосреды. Попытки рассмотреть формирование нарушений в слое среды при горизонтальном сдвиге блоков жесткого основания в рамках 2D моделирования с имитацией 3D условий [8] показали, что полноценное изучение закономерностей развития деформации и строения зон нарушений требует решения трехмерной задачи [6, 7].

Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим задачу о деформировании слоя среды (рис. 1). Слой находится под действием силы тяжести и лежит на жестком основании, в котором имеется продольный разрез. В соответствии с заданной глубиной и свойствами среды (плотностью вышележащих слоев) в состоянии упругости напряжения, обусловленные действием силы тяжести, при отсутствии дополнительных сил, будут такие:

$$\sigma_z(z) = -g \int_0^z \rho(z) dz, \\ \sigma_x(z) = \sigma_z(z)\xi, \quad \sigma_y(z) = \sigma_z(z)\xi, \quad (1)$$

где $\xi = \frac{\nu}{1-\nu}$, ν – коэффициент Пуассона, ρ – плотность среды.

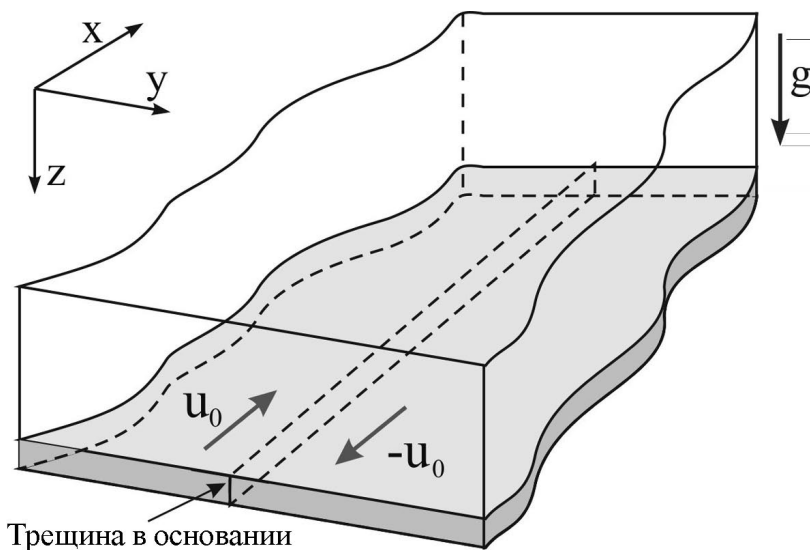


Рис. 1. Схема деформирования слоя среды при разрывном сдвиге основания

Полученные напряжения, которые рассчитаны в рамках упругого закона, будут начальными для случаев, когда состояние пластичности при заданной толщине среды не достигается. В противном случае, начальное напряженное состояние определяется путем решения уравнений, которые описывают состояние среды за пределом упругости.

Деформирование слоя осуществим через смещение левой и правой половинок основания в противоположных направлениях вдоль надреза. На торцевых, передней и задней гранях были использованы замкнутые условия, имитирующие бесконечную протяженность слоя. На боковых границах сохранялись нормальные напряжения начального состояния

При проведении расчетов деформация горных пород за пределом упругости описывалась при помощи соотношений модифицированной модели Друккера-Прагера-Николаевского [2, 3, 9]. Моделирование процессов осуществлялось путем решения системы уравнений, состоящей из уравнений движения и неразрывности, которая замыкалась указанными определяющими соотношениями упругохрупкопластической модели. Система уравнений решалась с использованием численной схемы [13] по изложенной в работе [9] процедуре. В комплексе программ 3D моделирования процессов деформации реализована технология параллельных вычислений для многоядерных вычислительных систем, что позволило проводить расчеты с достаточной детальностью.

Рассматривалась область размером $X=18$ км, $Y=80$ км, $Z=5$ км (из них 1 км – упругое основание) и пропорциональном изменении размеров сетки при увеличении толщины исследуемого слоя до 10 км. Параметры модели, описывающие свойства среды, которые соответствуют песчанику, приведены в таблице.

Заметим, что коэффициент Пуассона в породе-I и II имеет значение $\nu = 0,317$, состояние пластичности под действием силы тяжести достигается на глубине около 3,4 км при $\alpha = 0,3$ и около 8 км при $\alpha = 0,4$. В породе-III с коэффициентом Пуассона $\nu = 0,267$ пластичность наступает на глубине менее 2 км при $\alpha = 0,3$, чуть более 2,5 км при $\alpha = 0,4$ и около 4,5 км при $\alpha = 0,5$.

Результаты расчетов

На начальном этапе, при смещении блоков основания, напряженно-деформированное состояние слоя имеет характерный для трещины продольного сдвига вид, когда особенность имеют лишь касательные компоненты тензора напряжений. Однако в процессе пластического деформирования возникает серия полос локализованного сдвига [6, 7], напряженно-деформированное состояние становится неоднородным, а задача превращается в трехмерную.

Численное моделирование показало, что на структуру формирующихся нарушений влияют не только упругие и прочностные свойства среды, но и толщина слоя. На основе расчетов был выделен ряд характерные форм структур нарушений: 1) се-

Таблица. Параметры среды

Среда	ρ , г/см ³ плотность	K , ГПа модуль сжатия	μ , ГПа модуль сдвига	Y_0 , МПа коэф. когезии	α коэф. вн. трения	Λ коэф. дилатан- сии	γ^* деформация начала разупрочнения
Порода - I, II	2,2	12,8	5,34	20 8	0,65 0,3 0,5	0,1 0,08	0,04 0,001
Порода - III	2,35	20,0	11,0	8	0,3 0,5	0,08	0,001

рия поверхностей нарушений с небольшим углом наклона в горизонтальной плоскости или единая вертикальная поверхность с шероховатостями и узкой зоной оперяющих структур (рис. 2а); 2) сложная пространственная структура, состоящая из наклонных поверхностей нарушений, с хорошо выраженными оперяющими зонами разной ориентации (рис. 2б); 3) структура, в которой образуется две равноценные зоны сдвига, с четкими оперениями и

множеством пересекающихся поверхностей нарушений между ними (рис. 2в). Важнейшей особенностью процесса является то, что локализация деформации и разрушение происходят в виде серии наклонных поверхностей, меняющих с глубиной свою форму. В каждом из горизонтальных сечений формируется регулярная система зон локализации с углом наклона чуть более 10° или 40° по отношению к оси сдвига.

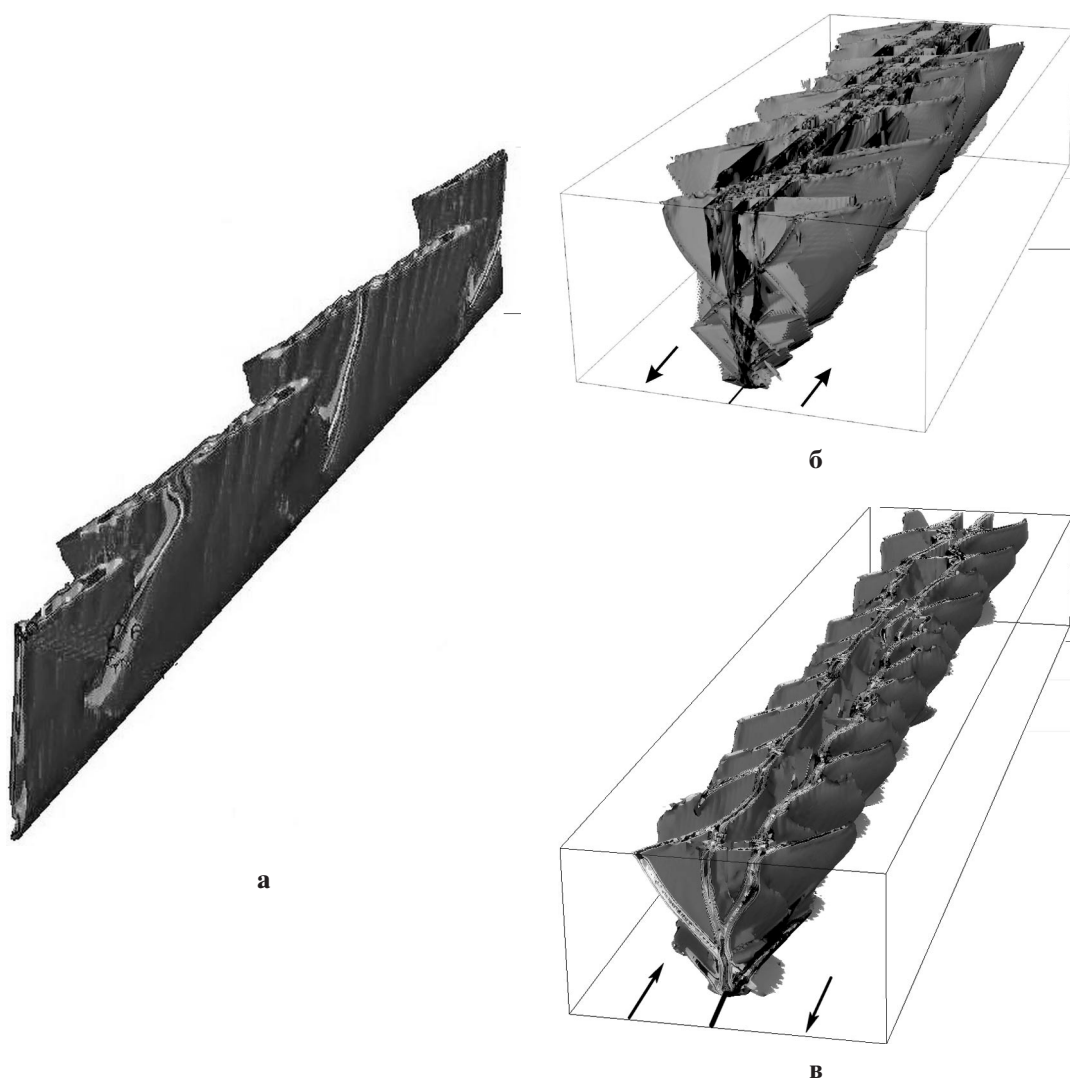


Рис. 2. Пространственная структура нарушений после выхода зон локализации на поверхность:

а – среда-I, слой 4 км; б – среда-II, $\alpha = 0,5$, слой 9 км; в – среда-III, $\alpha = 0,3$, слой 4 км

Первая из указанных форм структуры нарушений была получена для породы-I с высокой прочностью и длительной стадией упрочнения-разупрочнения ($\alpha = 0,65$; $Y_0=20$; $\gamma^*=4$ %) при толщине слоя 4 км. На картинах деформации достаточно хорошо просматриваются нарушения, идущие от исходного надреза в основании к верхней свободной поверхности (рис. 2а). Как правило, выделяются пропеллерообразные поверхности, соответствующие R полосам Риделя с углом наклона немногим более 10° на поверхности и чуть большим в горизонтальных сечениях на глубине. Нередко хорошо видны также сопряженные структуры R' . В основном такие сопряженные полосы локализации наблюдаются вблизи свободной поверхности на участках между основными полосами Риделя и имеют угол наклона $70-80^\circ$ в горизонтальной плоскости. Эти области соответствуют самым высоким значениям давления и наибольшим вертикальным смещению поверхности [6]. Вертикальный разлом со слабо выраженными опережающими зонами формируется в первую очередь в хрупкой среде с быстрым разупрочнением при небольшой толщине слоя. Такая картина деформирования наблюдалась в осадочном слое-II толщиной $Z=4$ км при $\alpha = 0,5$ и $Y_0=8$ и 20 МПа.

При тех же параметрах, но толщине слоя $Z=9$ км, строение нарушений имело совершенно иной вид и соответствовало второму типу (рис. 2б). В первую очередь было отмечено формирование более сложной картины. На поверхности четко проявились полосы, имеющие угол наклона

порядка 40° по отношению к направлению сдвига, а также основные – R и между ними сопряженные – R' полосы Риделя. Таким образом, было получено три семейства линий, а точнее поверхностей локализации. Учитывая, что в ходе деформирования происходит определенная трансформация нарушений, что может затруднить интерпретацию результатов, были рассмотрены этапы деформирования, когда происходило зарождение и развитие нарушений.

Было обнаружено, что происходит парное зарождение зон локализации, которые на ранних этапах напоминают раскрытые створки устрицы ввиду первоначально округлой формы и смыканию вблизи основания, над линией разреза (рис. 3). В горизонтальном сечении их угол наклона составлял более 40° , что соответствует T или e линиям отрыва [11, 12]. Еще одной важной особенностью является то, что в парах наблюдался несимметричный рост “створок”, одна из них несколько больше развивалась по одну сторону от разреза, а вторая – по другую сторону. По мере роста и приближения к верхней поверхности данных поверхностей нарушений возникали R полосы Риделя (рис. 2б). Причем последние формируются вблизи поверхности слоя. В ходе дальнейшей деформации наибольшее развитие получает последний тип нарушений, сквозь которые пробиваются линии магистрального разлома. Вблизи поверхности происходит слияние в одну криволинейную зону створок нарушений, которые принадлежат разным парам и в основании значительно сдвигаются

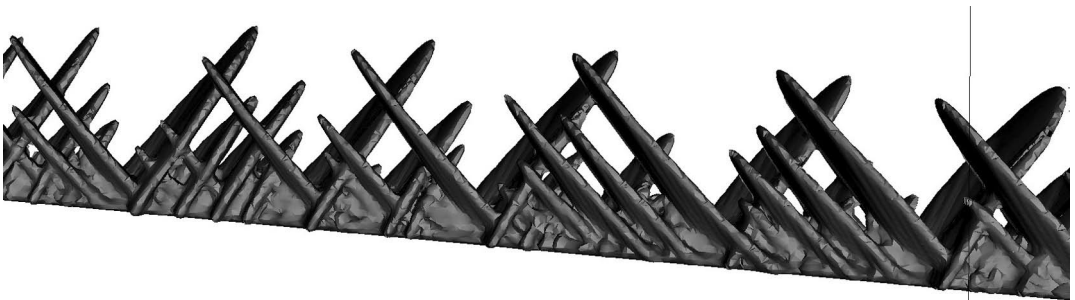


Рис. 3. Парное зарождение зон локализации в виде створок устриц

нуты относительно друг друга. Итоговая картина, иллюстрирующая строение нарушений, показана на рис. 2б.

Похожая структура нарушений была получена в слое толщиной 4 км для параметров осадочной породы-III при $\alpha = 0,5$. Важным отличием данного случая является то, что коэффициент Пуассона отличается от предыдущего варианта и составляет $\nu = 0,267$, что приводит к коэффициенту бокового отпора $\xi = 0,364$. Таким образом, боковые напряжения, действующие в слое, заметно отличались от рассмотренного выше варианта, где $\xi = 0,464$.

При достижении T -е разрывами верхней поверхности R линии нарушений почти не заметны, т. к. быстро формируется магистральный разлом. В итоге, развитие деформации в T -е поверхностях прекращается, в дальнейшем смещение происходит вдоль L поверхности магистрального разлома. Здесь также вблизи поверхности происходит слияние в одну зону разных

створок нарушений и единый в верхней части разрыв на глубине разделяется на две не связанные и сдвинутые вдоль оси разлома разрыва. Структура нарушений у поверхности становится достаточно сложной. Наряду с указанными зонами, в ней можно выделить практически все наблюдаемые в природе типы разрывов R' , L и др.

Достаточно сходная по структуре и этапам формирования была получена картина для осадочной породы-II с коэффициентом $\alpha = 0,3$. В этом случае нижняя часть слоя перешла в неупругое состояние уже на этапе приложения силы тяжести, но ее величина составляла менее 0,1 %. Основным отличием от предыдущего случая является выраженная несимметрия развития T -е поверхностей нарушений (рис. 2в). В итоге, при достижении ими верхней поверхности образуются две L линии локализации и в дальнейшем два близких магистральных шва (рис. 2в). Вид распределения деформации в вертикальном сечении, который показан на рис. 4, в полной мере

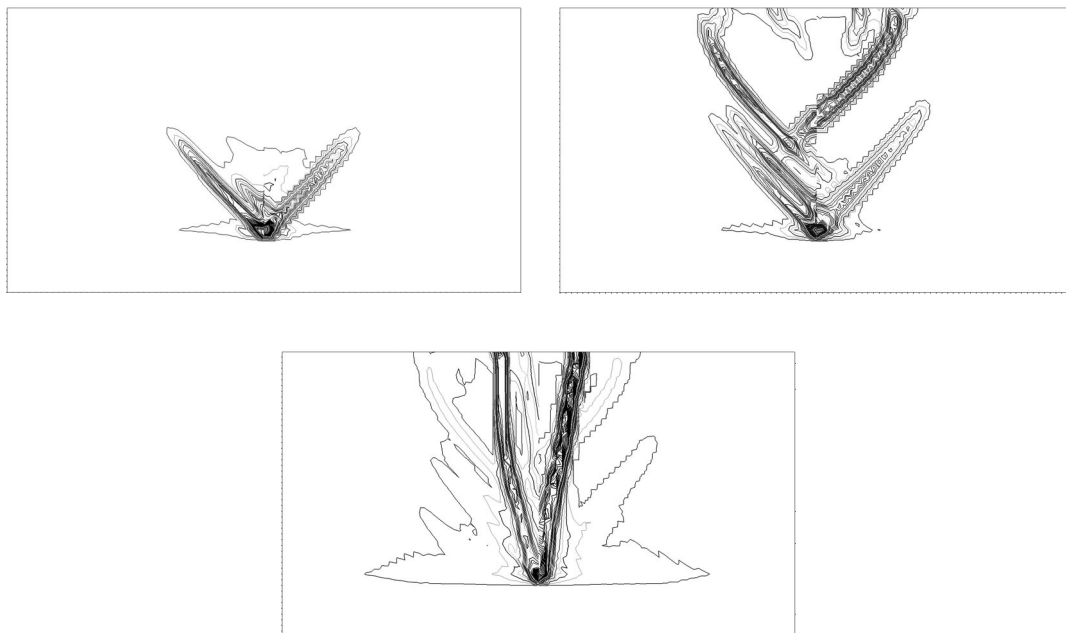


Рис. 4. Изолинии интенсивности неупругой деформации в вертикальном сечении на разных этапах развития поверхностей нарушений

соответствует принятому названию строения подобных зон нарушений как “цветковые структуры”. На рисунке хорошо видны этапы развития зон локализации, а также то, что формирование магистральных разрывов L начинается с поверхности после ее достижения наклонными зонами локализации. Серии R и R' линий практически не заметны. Вероятно, это обусловлено быстрым формированием магистральных разрывов. На рис. 3, по бокам от основной структуры, вблизи основания, можно увидеть следы R' полос, которые зарождались на начальном этапе деформирования. При рассмотрении деформирования слоя 4 км осадочной породы-III с коэффициентом $\alpha = 0,3$ прослеживается, что более половины толщины слоя перешло в неупругое состояние уже на этапе приложения силы тяжести. Однако здесь также величина неупругой деформации оставалась достаточно малой, не превышала 0,1 %, таким образом, на этом этапе процесс разупрочнения не начинался. Полученная картина деформирования в данном случае принципиально не отличалась от описанной выше.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что в условиях разрывного горизонтального сдвига основания возможно формирование нескольких принципиально различных структур нарушений в осадочном слое. В первом типе основными являются наклонные поверхности Риделя, ориентированные под небольшим углом наклона в горизонтальной плоскости, или единая поверхность с шероховатостями и узкой зоной оперяющих структур. Второй тип имеет более сложное пространственное строение, состоит из наклонных поверхностей нарушений, ориентированных под углом $\sim 40^\circ$ в горизонтальной плоскости по отношению к оси сдвига. После их выхода на свободную поверхность сверху формируется магистральный разрыв с хорошо выраженными оперяющими зонами разной ориентации. Возможно формирование двух равноценных систем

нарушений по разные стороны от оси сдвига и образовании впоследствии двух магистральных разрывов. Такой тип деформирования был получен при наличии пластического слоя в нижней части среды. Результаты численного моделирования показали, что строение зоны сдвига зависит не только от свойств среды, но и от толщины деформируемого слоя.

Несмотря на то, что полученные результаты имеют модельный характер, соответствуют упрощенным условиям деформирования и свойствам среды, возможность рассмотрения разных стадий развития разломной структуры, тем более в трехмерном представлении, может быть полезной при анализе данных сейсморазведки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-05-00661-а) и Интеграционного проекта СО РАН № 127.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гогоненков Г. Н., Кашик А. С., Тимурзиев А. И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири//Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–18.
2. 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.
3. Николаевский В. Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды//ПММ. 1971. Т. 35. Вып. 6. С. 1017–1029.
4. Ребецкий Ю. Л., Михайлова А. В. Роль сил гравитации в формировании глубинной структуры сдвиговых зон//Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 1. Р. 45–67
5. Ребецкий Ю. Л., Михайлова А. В., Сим Л. А. Морфология структур разрушения в глубине зон сдвига по результатам математического моделирования//Материалы Всероссийской конференции “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М. В. Гзовским лабораторией тектонофизики в ИФЗ РАН” 13–18 октября 2008, г. Москва. С. 182–207.
6. Стефанов Ю. П., Бакеев Р. А. Формирование полос локализованного сдвига в слое геосреды при разрывном сдвиге основания//Физ. мезомех. 2012. Т. 15. № 2. С. 77–84.

7. Стефанов Ю. П., Бакеев Р. А., Ребецкий Ю. Л., Конторович В. А. Структура и стадии формирования разломной зоны в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания//Физ. мезомех. 2013. Т. 16. № 5 (в печати).

8. Стефанов Ю. П., Бакеев Р. А., Смолен И. Ю. О закономерностях деформирования горизонтальных слоев среды при разрывном сдвиговом смещении основания//Физ. мезомех. 2009. Т. 12. № 1. С. 83–89.

9. Стефанов Ю. П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упругохрупкопластичных материалов//Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 3. С. 129–142.

10. Тимурзиев А. И. Развитие представлений о строении “цветковых моделей” силвестера на основе новой кинематической модели сдвигов//Геофизика 2010. № 2. С. 24–31.

11. Hancock P. L. Brittle mirotectonics: principles and practice//J. Struct. Geol. 1985. Vol. 7. No 3–4. P. 437–457.

12. Sylvester G. Strike-slip faults//Geol. Soc. Am. Bull. 1988. Vol. 100. No 31. P. 1666–1703.

13. Wilkins M. L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

Рукопис отримано 14.10.2013.

У 3D постановці виконано числове моделювання формування порушень в осадовому шарі під час горизонтального зсуву блоків фундаменту.

Розглянуті особливості будови зон локалізації деформації на різних етапах розвитку – від зародження до формування розвиненої картини порушень. Показано, що залежно від властивостей за міцністю й пружністю, а також товщиною шару можливе формування “квіткових” структур принципово різної будови.

Ключові слова: *напружено-деформований стан, локалізація деформації, порушення, смуги Ріделя, “квіткові” структури, 3D числове моделювання, визначальні співвідношення, деформація зсуву.*

In the 3D setting numerical modeling of the formation of strike-slip faults in the sediment at a horizontal shift of the foundation blocks. The morphology of deformation localization zones at different stages of development from fracture nucleation to formation of mature pattern of faults are study It is shown that depending on the elastic and strength properties as well as thickness of the layer may be formed flowering structures essentially different geometry and kinematics.

Keywords: *3D modeling, geomedium layer, deformation, localization, shear band, strike-slip fault, “flower” structure, dilatancy, gravity.*