



РАЗВИТИЕ НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЖАТИИ ОСАДОЧНОГО СЛОЯ

А.А. Татаурова¹, Ю.П. Стефанов^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, Томск, просп. Академический, 2/4, Россия,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

В рамках упругопластической модели рассмотрено развитие необратимой деформации при горизонтальном сжатии осадочного слоя, лежащего на жестком основании. Изучено влияние прочностных параметров среды и трения в основании на конфигурацию зон пластичности и локализацию деформации. Выполнены аналитические оценки глубин, на которых развивается необратимая деформация, а также их изменения в результате роста горизонтальных напряжений. С помощью численного моделирования показаны особенности зарождения и развития полос локализованного сдвига. Построены схемы, иллюстрирующие характер развития полос локализации в зависимости от свойств среды.

Пластическая деформация, локализация деформации, разлом, надвиговые структуры, трение, внутреннее трение, сдвиговая прочность, осадочный слой

DEVELOPMENT OF IRREVERSIBLE DEFORMATION AND LOCALIZED SHEAR BANDS UNDER HORIZONTAL COMPRESSION OF THE SEDIMENTARY LAYER

A.A. Tataurova¹, Yu.P. Stefanov^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Akademicheskoy Ave., 2/4, Tomsk, 634055, Russia,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

Within the framework of the elastoplastic model, the development of irreversible deformation during horizontal compression of a sedimentary layer lying on a rigid foundation is considered. The influence of strength parameters of the medium and friction in the base on the configuration of plasticity zones and localization of deformation has been studied. Analytical estimates are made of the depths at which irreversible deformation develops, as well as their changes as a result of an increase in horizontal stresses. With the help of numerical simulation, the features of the origin and development of localized shear bands are shown. Schemes are constructed illustrating the nature of the development of localization bands depending on the properties of the medium.

Plastic deformation, deformation localization, fault, thrust structures, friction, internal friction, shear strength, sedimentary layer

ВВЕДЕНИЕ

Развитие псевдопластической деформации, формирование зон локализации и разломов представляет огромный интерес в изучении деформационных структур земной коры. Данные процессы определяются условиями деформирования и множеством факторов, выяснение роли которых

необходимо для понимания протекающих процессов, объяснения наблюдаемых явлений, формулировке и уточнения гипотез. Процессы, протекающие в условиях горизонтального сжатия, широко распространены в земной коре и наблюдаются на различных масштабах, от локального до регионального. В качестве примеров таких зон можно указать предгорные области [Парфенов, Кузьмин, 2001; Яковлев, 2012; Малышев и др., 2018; Ребецкий, 2020].

Важным обстоятельством является то, что нередко наблюдается неравномерность горизонтального сжатия по глубине. Это приводит к разрыву смещений и формированию детачмента. При деформировании осадочного чехла, лежащего на жестком фундаменте, имеет место существенное различие их механических свойств и, соответственно, значительное различие деформации.

В настоящее время численное геомеханическое моделирование стало одним из важнейших инструментов изучения процессов деформации, расчета напряженно-деформированного состояния литосферы на разных пространственных и временных масштабах [Schmalholz, Podladchikov, 2001; Stockmal et al., 2007; Ruh, Kaus, 2012; Полянский и др., 2014; Wu et al., 2015]. Во многих случаях расчеты проводятся в рамках упруго-вязкой постановки, которая позволяет рассматривать процессы длительной эволюции и при этом является относительно простой с точки зрения численных расчетов. В настоящее время все больше используют варианты упругопластических моделей [Chemenda et al., 2015; Стефанов, Бакеев, 2015], в том числе с учетом вязкости, поврежденности и других характеристик.

В данной работе в рамках упругопластической модели рассмотрим задачу о сжатии клиновидного осадочного слоя, который залегает на жестком основании. Такую геометрию широко используют для описания процессов деформации в пределах предгорных областей [Davis et al., 1983; Dahlen, 1990]. В работах [Стефанов, Татаурова, 2018; Tataurova et al., 2019] на основе результатов численного моделирования показан ряд особенностей зарождения и развития полос локализованной деформации в условиях горизонтального сжатия клиновидного осадочного слоя. В частности, было показано, что протяженное продвижение области развития необратимой деформации возможно лишь при низком трении в основании, а также при его снижении в ходе развития деформации.

Для описания процесса деформации будет использован вариант упругопластической модели среды, которая позволяет описывать развития необратимой деформации с учетом формирования полос локализованного сдвига. Основная цель работы заключается в исследовании роли упругих и прочностных параметров геологической среды на развитие необратимой деформации и образование полос локализованного сдвига, а также влияние трения в основании осадочной толщи на развитие процесса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим процесс деформации однородного осадочного слоя в условиях горизонтального сжатия для модели усеченного клина, который лежит на жестком основании (рис. 1). Верхняя граница клина горизонтальна и свободна от напряжений. Деформирование слоя осуществляется в результате горизонтального смещения левой границы, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Схема нагружения осадочного слоя среды

Предполагалось, что при смещении среды по жесткому фундаменту действует базальное трение, описываемое при помощи закона Амонтона–Кулона

$$|\sigma_\tau| \leq -\mu_b \sigma_n,$$

где σ_τ , σ_n – касательная и нормальная компонента напряжений, μ_b – коэффициент трения. При $|\sigma_\tau| < -\mu_b \sigma_n$ имеет место полное сцепление: $u_\tau = 0$. При $|\sigma_\tau| = -\mu_b \sigma_n$ возможно смещение вдоль основания. Изменение коэффициента трения в ходе развития необратимой деформации опишем при помощи соотношения, предложенного в работах [Стефанов, Татаурова, 2018; Tataurova et al., 2019]:

$$\mu_b(\gamma^p) = \mu_0 \left(1 - \frac{\gamma^p - \gamma^1}{\gamma^f} \right)$$

для $\gamma^1 \leq \gamma^p \leq \gamma^f$, где γ^p , γ^1 и γ^f – соответственно интенсивность сдвиговой пластической деформации, величина деформации начала и завершения снижения трения вследствие дробления породы, μ_0 – начальное трение. Данное выражение достаточно близко к уравнению, предложенному в [Andrews, 1976], с той разницей, что вместо смещения используется величина необратимой сдвиговой деформации.

При заданных размерах расчетной области напряжения, вызванные действием силы тяжести, в значительной мере определяют эффективную прочность среды и оказывают огромное влияние на развитие деформации. Поэтому рассмотрение процесса деформации необходимо осуществлять в два этапа. На первом этапе рассчитывается начальное напряженно-деформированное состояние, обусловленное гравитацией при отсутствии горизонтальных смещений на боковых границах расчетной области. Заметим, что уже на этом этапе нагружения возможно развитие необратимой деформации в нижней части слоя.

На втором этапе осуществляется моделирование процесса деформации под действием смещения левой боковой границы слоя. При этом на правой границе слоя сохраним горизонтальные напряжения, которые были рассчитаны на первом этапе: $\sigma_{ij}(x_2, z, t) = \sigma_{ij}(x_2, y, z, t = 0)$. Указанные условия не препятствуют деформации на правой границе слоя в ходе развития процесса и имитируют его продолжение.

Моделирование процесса деформации среды в интересующих нас условиях будем осуществлять при помощи численного решения системы уравнений механики, включающей уравнения движения и неразрывности:

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \frac{du_i}{dt}, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho u_{i,i} = 0,$$

где ρ – плотность материала; $u_{i,j}$ – компоненты вектора скорости; σ_{ij} – компоненты тензора напряжения Коши; F_i – массовые силы, в нашем случае – ускорение свободного падения g .

Описание процесса деформации и разрушения горных пород осуществляется в рамках упругопластической модели. Под пластической деформацией в данной работе будет подразумеваться необратимая деформация независимо от ее природы. Предполагается, что скорости деформации состоят из упругой d_{ij}^e и пластической d_{ij}^p частей. Соответственно, напряжения определяются из уравнения

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\theta - \theta^p)\delta_{ij} + 2\mu(d_{ij} - d_{ij}^p),$$

где λ и μ – коэффициенты Ламе; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши, $\theta = d_{ii}$, δ_{ij} – символ Кронекера.

Приращение неупругой или пластической части тензора деформации, которое рассчитывается при достижении напряжениями предельной поверхности, определяется уравнением:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \frac{t}{t^{rel}},$$

где $G(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p)$ – пластический потенциал; $d\lambda$ определяется в ходе деформирования из условия пластичности, t^{rel} – параметр. Применение такого соотношения в модели соответствует вязкопластическому элементу Бинагама и решает проблему регуляризации [Prevost, Loret, 1990]. Это нивелирует влияние пространственного шага расчетной сетки и обеспечивает сходимость решений на закритической стадии, когда возникает локализация деформации.

Уравнения предельной поверхности и пластического потенциала [Друккер, Прагер, 1975; Николаевский, 1971] запишем в виде:

$$f = \tau - \alpha\sigma - Y, \quad G = \tau - \beta\sigma,$$

где $\sigma = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – первый инвариант тензора напряжений; $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ – интенсивность касательных напряжений, β – коэффициент дилатансии, α и Y – коэффициенты, которые могут быть выражены через углы внутреннего трения и дилатансии φ, ϕ и когезию C модели Кулона-Мора, хотя данные параметры моделей не являются полными аналогами.

Начальная предельная поверхность соответствует пределу упругости и описывает лишь начало процесса, дает первые оценки зарождения пластической деформации. Изменения предельной поверхности в ходе развития необратимой деформации на стадиях упрочнения и разупрочнения задается с помощью уравнения [Стефанов, 2002]

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

где h – коэффициент упрочнения, $d\gamma^p$ – интенсивность сдвиговой пластической деформации, $A(\gamma^p) = 2\gamma^p/\gamma^*$, $D(\gamma^p) = (\gamma^p/\gamma^*)^2$, γ^* – критическая деформация, после которой преобладает деградация материала.

Система уравнений, решалась при помощи явной конечно-разностной схемы [Wilkins, 1999]. Основные детали использованного подхода описаны в работах [Стефанов, Бакеев, 2015].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Аналитические оценки

На разных этапах деформирования образуется свое характерное напряженное состояние, которое задает распределение прочности в среде. Поскольку данные характеристики взаимосвязаны, их распределение определяет общее строение и геометрию деформированной области. Поэтому анализ распределения этих областей дает важную информацию о развитии процесса.

Итогом первого этапа нагружения среды являются напряжения, возникающие вследствие действия силы тяжести. На рисунке 2 показаны графики изменения эффективной прочности $\tau^* = Y + \alpha\sigma$ и

интенсивности касательных напряжений с глубиной в условиях действия гравитационной нагрузки при отсутствии горизонтальных смещений среды для упругого состояния среды, а также их изменения с ростом горизонтальных напряжений на 45 и 90 МПа при коэффициенте Пуассона $\nu = 0.25$ и плотности $\rho = 2.2$. Там, где интенсивность касательных напряжений превышает величину эффективной прочности, состояние среды находится за пределом упругости. Данные области выделены цветом. Точка пересечения графиков соответствует глубине перехода в неупругое состояние. На графиках видно, что в рассматриваемых условиях, начиная с некоторой глубины, определяемой параметрами внутреннего трения α и когезии Y , возможен переход среды в неупругое состояние. В упругопластическом состоянии напряжения значения прочности будут меняться по другому закону и должны рассчитываться с учетом необратимой деформации. Величина необратимой деформации на первом этапе нагружения остается достаточно малой, чтобы не принимать ее во внимание при дальнейшем анализе.

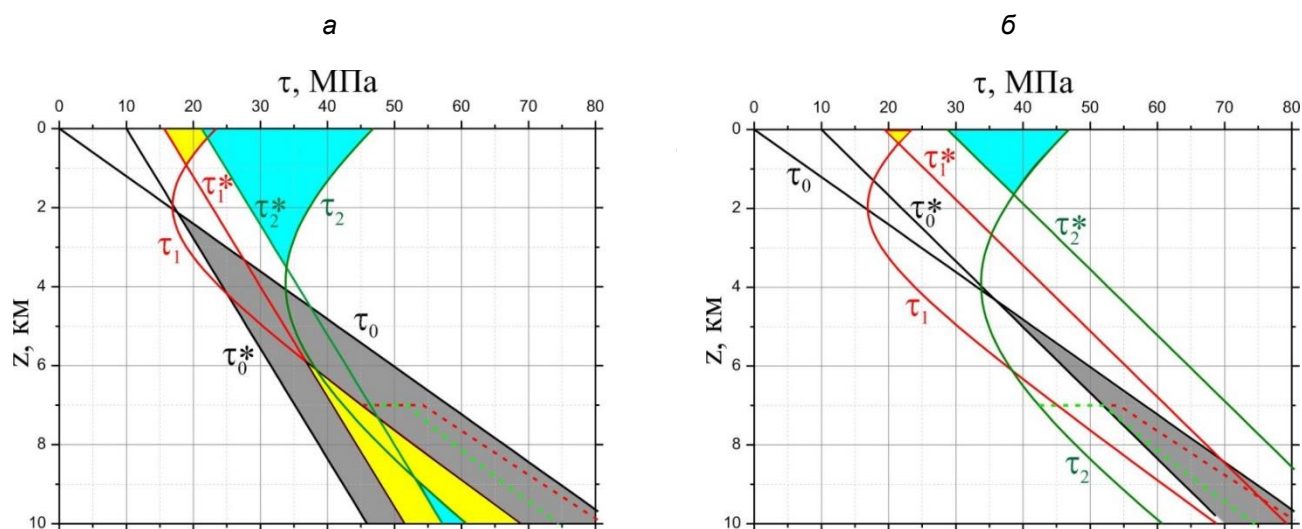


Рис. 2. Распределения прочности τ^* и интенсивности касательных напряжений τ с глубиной после первого этапа нагружения индекс (0), при дополнительном горизонтальном сжатии $\Delta\sigma = 45$ МПа – (1) и $\Delta\sigma = 90$ МПа – (2): а – $\alpha = 0.3$, б – $\alpha = 0.5$. Пунктиром показаны графики с учетом возможного влияния трения. Цветом выделены области неупругого состояния

Заметим, что данные оценки приведены для «сухой» среды, без учета порового давления. При использовании эффективных напряжений Терцаги необходимы данные о распределении порового давления σ^{por} . Для проницаемой среды их можно определить как вес столба жидкости.

Для оценки влияния сжатия по горизонтали на втором этапе нагружения допустим, что область исследования прямоугольная и трение в основании отсутствует. Тогда горизонтальное сжатие будет равномерным по всей глубине. Одинаковое приращение горизонтальной компоненты напряжений по всей глубине приводит к пропорциональному увеличению сдвиговой прочности за счет увеличения давления и изменению распределения интенсивности касательных напряжений с глубиной. На данных рис. 2 хорошо видно, что увеличение горизонтальной компоненты напряжений приводит к быстрому росту интенсивности касательных напряжений в верхней части среды, при значительно меньшем увеличении давления. В то же время в нижних слоях на первых этапах горизонтального сжатия, пока горизонтальные напряжения меньше вертикальных, происходит обратный процесс, интенсивность касательных напряжений снижается при росте средних напряжений или давления среды. Это приводит к тому, что на этом этапе нагружения

интенсивное развитие псевдопластической деформации происходит в верхней части среды с поверхности, в то время как развитие необратимой деформации на глубине тормозится. Лишь после того, как горизонтальные напряжения становятся больше вертикальных, увеличение интенсивности касательных напряжений по всей глубине происходит равномерно. Заметим, что данные оценки проведены без учета трения в основании слоя и они справедливы лишь для начальных этапов зарождения и развития необратимой деформации.

На основе полученных оценок распределения зон пластичности с глубиной можно построить общую схему развития областей необратимой деформации в клиновидном слое и выделить участки возможного зарождения полос локализованного сдвига (рис. 3). На рисунке выделен ряд зон: **S**, **G** – области необратимой деформации, вызванные горизонтальным и вертикальным сжатием, соответственно, под действием гравитации, **F** – обусловлена условиями трения на поверхности детачмента и сжатием, **T** – зона интенсивного разрушения и образования детачмента, **SB1** – полосы локализованного сдвига формирующиеся на поверхности, **SB2** – полосы формирующиеся на основании и в вершине детачмента. Представленная схема согласуется с оценками, полученными в работе [Gerbault et al., 1998]. Очевидно, что формирование полос и характер их развития будет зависеть от конкретных параметров среды. Такими параметрами являются внутреннее трение и трение в основании. Исследование их влияния может быть выполнено лишь с помощью численного моделирования.

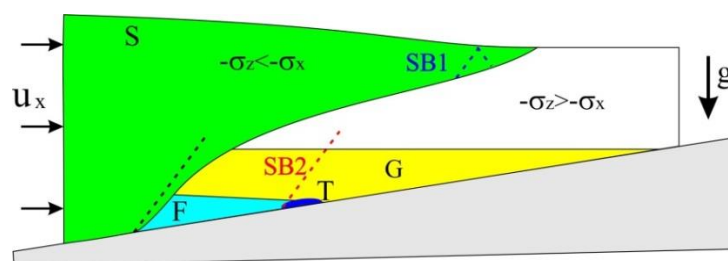


Рис 3. Схема развития процесса необратимой деформации при латеральном сжатии деформируемого слоя

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Размеры исследуемой области составляли 10.5 км по вертикали и 150 км по горизонтали. Наклон основания составлял 1.5°. Расчеты проводились на адаптированной сетке 750 x 52 ячеек. Параметры модели, описывающие поведение среды, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели, описывающие поведение среды

ρ , г/см ³	K , ГПа	μ , ГПа	γ_0 , МПа	α	β	γ^* , %	h	γ_0 , %	μ_b
2.37	0.208	0.117	5–20	0.1–0.6	0.1 α	0.01	0.5	0.5	0.1–0.5

Численное моделирование позволило выявить ряд характерных картин развития деформации и формирования полос локализованного сдвига, которые определялись прочностными параметрами среды и трением в основании слоя. Отметим факторы, определяющие зарождение, характер распространения и форму полос локализации деформации в среде с учетом и без учета порового давления с помощью эффективных напряжений Терцаги.

Различие формы области необратимой деформации на начальном этапе деформирования в сухой и насыщенной средах возникает за счет разной скорости роста прочности с глубиной, по сути – разным значениям коэффициента внутреннего трения. Под действием горизонтального сжатия в сухой среде с высоким внутренним трением формируется зона пластичности, которая в верхней части слоя более протяженная чем в нижней. В этом случае полосы малой интенсивности в среде могут зарождаться на поверхности во фронте необратимой деформации, они могут иметь разную направленность и обычно не достигают основания. В насыщенной среде, а также при низком значении коэффициента внутреннего трения, пластическая зона выглядит наоборот: нижняя часть находится в пластическом состоянии. Данный эффект соответствует оценкам на рис. 2, 3.

На рисунке 4 показаны результаты численного моделирования, иллюстрирующие характерные конфигурации полос локализованного сдвига, которые формируются в средах с разным внутренним трением. Зарождение полос чаще происходит в местах искажения геометрии и в области резкого изменения трения в основании. Наибольшее изменение геометрии, как правило, связано с выходом на поверхность полосы локализации. Это приводит к эстафетному характеру формирования и распространения новых полос сдвига. Изменение трения, согласно предложенной модели, также связано с необратимой деформацией и обеспечивает периодический характер формирования полос локализации. Заметим, что в рамках принятой модели формирования детачмента в основании вследствие снижения трения при развитии необратимой деформации, первоначальный коэффициент трения практически перестает играть значение. Скольжение происходит лишь в зоне, где коэффициент трения стал ниже 0.1, в то время как в недеформированной области при коэффициенте трения более 0.2 скольжение быстро затухает.

На основе результатов моделирования построены две основные схемы формирования и развития полос локализованного сдвига в однородной среде (рис. 5). Первый случай (рис. 5, а) наиболее четко соответствует эстафетному характеру продвижения полос локализации, они образуются в местах искажения геометрии. В основании это может быть зона перехода скольжения с низким трением и зоны высокого трением или место «отражения» развивающейся полосы локализации. На поверхности обычно это место «отражения» полосы локализации, которая достигла поверхности, там образуется ступенька или участок искривления поверхности на границе утолщения среды в результате сжатия. Чаще всего, такая схема наблюдается при высоком внутреннем трении. Полосы локализации деформации имеют почти прямолинейный вид. Искривления возникают в местах разнонаправленных полос сдвига. Часто формируются призматические блоки, которые выдавливаются вверх. Смещения вдоль полос локализованного сдвига имеют большую амплитуду, а зона деформации обычно имеет не слишком большую протяженность вдоль слоя, часто не более 2–3 толщин слоя.

Вторая схема, показанная на рис. 5, б, реализуется в пластичной среде с низким внутренним трением ($\alpha < 0.2$) или в насыщенной среде, где снижение влияния внутреннего трения связано с поровым давлением. В этом случае полосы локализации обычно имеют листрическую форму. Нередко места зарождения полос достаточно близко расположены и в результате формируется веерообразная или чешуйчатая картина разломов. Причем изменение рельефа в зонах выхода полос локализации на поверхность также играет существенную роль. Поверхность приобретает ступенчатый вид, и на каждой ступеньке образуется новая полоса локализованного сдвига, которая распространяется вниз эстафетным образом. Причем сначала она достигает восходящей полосы – разлома и лишь на следующих этапах продвигается вниз, после чего продолжается эстафетное продолжение новой восходящей полосы.

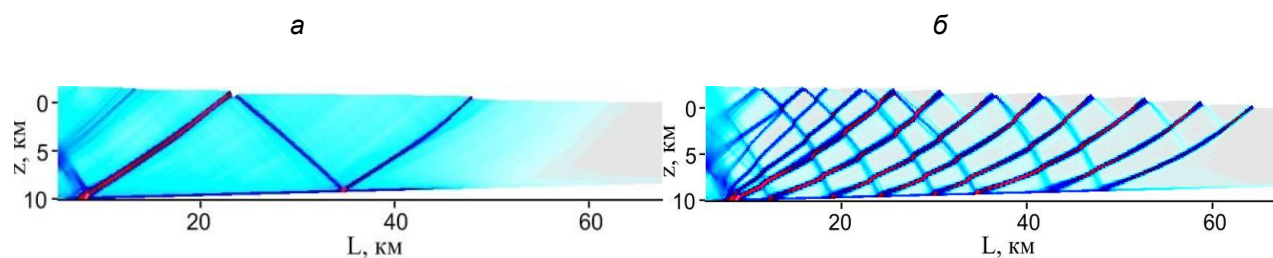


Рис. 4. Характерный вид образования полос локализованного сдвига: *а* – в сухой среде, $\alpha = 0.3$; *б* – в насыщенной среде, $\alpha \leq 0.2$

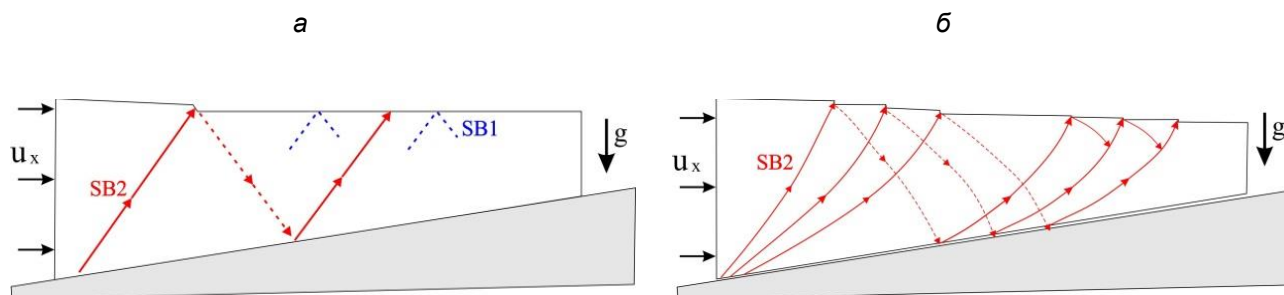


Рис. 5. Схема формирования полос локализованного сдвига: *а* – в среде с высоким коэффициентом внутреннего трения; *б* – в пластичной среде с низким внутренним трением и в насыщенной среде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании аналитических оценок и результатов численного моделирования построена схема формирования и развития необратимой деформации при горизонтальном сжатии осадочного слоя. Она включает клинообразную зону в верхней части, связанную с горизонтальным сжатием, зону в нижней части, связанную с силой тяжести, и клинообразную зону, связанную с трением в основании.

Полосы локализованного сдвига могут развиваться как от дневной поверхности, так и от подошвы осадочной толщи. Их зарождение определяется внутренним трением в среде и трением в основании. В среде с высоким внутренним трением полосы локализованного сдвига малой интенсивности зарождаются на дневной поверхности и не всегда достигают основания. В пластичной среде с низким внутренним трением и в насыщенной среде они развиваются от detachment к поверхности.

Выделено два типа конфигурации деформационных структур, в которых полосы локализованного сдвига имеют «листрическую» или «зигзагообразную» форму. Формирование и развития полос локализованного сдвига в зависимости от упругопластических свойств среды чаще всего происходит эстафетным образом, зарождаясь в местах искажения геометрии по одной из двух схем. В основании это может быть граница участка скольжения с низким трением и области с более высоким трением или место «отражения» развивающейся полосы локализации. Как правило, такая схема развивается в сухой среде, при высоких значениях коэффициента внутреннего трения, когда формируется одна или несколько почти прямолинейных полос локализации, которые пересекают весь слой от основания к поверхности.

Вторая схема, реализуется в пластичной среде с низким значением внутреннего трения или в насыщенной среде, где снижение влияния внутреннего трения может быть связано с поровым давлением или наличием вязких фракций. В этом случае полосы локализации обычно имеют листрическую форму.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Малышев С.В., Худолей А.К., Гласмахер У.А., Казакова Г.Г., Калинин М.А.** Определение этапов формирования юго-западной части Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным трекового датирования апатита и циркона // Геотектоника. – 2018. – № 6. – С. 55–68, doi: 10.1134/S0016853X1806005X.
- Николаевский В.Н.** Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // Прикладная математика и механика. – 1971. – № 35 (6). – С. 1017–1029.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И.** Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК Наука/Интерпериодика, 2001. – 571 с.
- Полянский О.П., Коробейников С.Н., Бабичев А.В., Ревердатто В.В., Свердлова В.Г.** Численное моделирование мантийного диапиризма как причины внутриконтинентального рифтогенеза // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 124–137, doi: 10.7868/S0002333714060052.
- Ребецкий Ю.Л.** Поле глобальных коровых напряжений земли // Геотектоника. – 2020. – № 6. – С. 3–24, doi: 10.31857/S0016853X20060119.
- Стефанов Ю.П.** Локализация деформаций и нарушений в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 5 (5). – С. 107–118.
- Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А.** Формирование цветковых структур нарушений в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 81–93, doi: 10.7868/S0002333715040110.
- Стефанов Ю.П., Татаурова А.А.** Влияние трения и прочностных свойств среда на формирование зон локализации деформации в надвиговых структурах // Физическая мезомеханика. – 2018. – № 21 (5). – С. 46–55, doi: 10.24411/1683-805X-2018-15005.
- Яковлев Ф.Л.** Опыт построение сбалансированной структуры восточной части Альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 1 (19). – С. 191–214.
- Andrews D.J.** Rupture velocity for plane strain shear cracks // Journal of Geophysical Research. – 1976. – Vol. 81 (32). – P. 5679–5687, doi: 10.1029/JB081i032p05679.
- Chemenda A.I., Cavalié O., Vergnolle M., Bouissou S., Delouis B.** Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system // Comptes Rendus Geoscience. – 2015. – Vol. 348 (1). – P. 61–69, doi: 10.1016/j.crte.2015.09.008.
- Dahlen F.A.** Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedge // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 1990. – Vol. 18. – P. 55–99, doi: 10.1146/ANNUREV.EA.18.050190.000415.
- Davis D., Suppe J., Dahlen F.** Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges // Journal of Geophysical Research. – 1983. – Vol. 82. – P. 1153–1172, doi: 10.1029/JB088iB02p01153.
- Gerbault M., Poliakov A.N., Daignieres M.** Prediction of faulting from the theories of elasticity and plasticity: What are the limits? // Journal of Structural Geology – 1998. – Vol. 20 (2). – P. 301–320, doi: 10.1016/S0191-8141(97)00089-8.

- Prevost J.H., Loret B.** Dynamic strain localization in elasto-(visco) plastic solids, part 2. Plane strain examples // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1990. – Vol. 83. – P. 275–294, doi: 10.1016/0045-7825(90)90074-V.
- Ruh J.B., Kaus B.J.** Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belt: influence of rheology of single and multiple décollements // *Tectonics*. – 2012. – Vol. 31. – P. 1–23, doi: 10.1029/2011TC003047.
- Schmalholz S.M., Podladchikov Y.Y.** Viscoelastic Folding: Maxwell versus Kelvin Rheology // *Geophysical Research Letters*. – 2001. – Vol. 28 (9) – P. 1835–1838, doi: 10.1029/2000GL012158.
- Stockmal G.S., Beaumont C., Nguyen M., Lee B.** Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts: Insights from numerical models // *GSA Special Paper*. – 2007. – Vol. 433. – P. 63–98, doi: 10.1130/2007.2433(04).
- Tataurova A., Stefanov Y., Suvorov V.** Effect of changing basal friction on the formation of thrust // *Trigger Effects in Geosystems*. – Springer, Cham, 2019. – P. 169–177, doi: 10.1007/978-3-030-31970-0_19.
- Wilkins M.L.** Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin–Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1999. – 246 p.
- Wu G., Lavier L.L., Choi E.** Modes of continental extension in a crust wedge // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – Vol. 421. – P. 89–97, doi: 10.1016/j.epsl.2015.04.005.

REFERENCES

- Andrews D.J.** Rupture velocity for plane strain shear cracks // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – Vol. 81 (32). – P. 5679–5687, doi: 10.1029/JB081i032p05679.
- Chemenda A.I., Cavalié O., Vergnolle M., Bouissou S., Delouis B.** Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system // *Comptes Rendus Geoscience*. – 2015. – Vol. 348 (1). – P. 61–69, doi: 10.1016/j.crte.2015.09.008.
- Dahlen F.A.** Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedge // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1990. – Vol. 18. – P. 55–99, doi: 10.1146/ANNUREV.EA.18.050190.000415.
- Davis D., Suppe J., Dahlen F.** Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges // *Journal of Geophysical Research*. – 1983. – Vol. 82. – P. 1153–1172, doi: 10.1029/JB088iB02p01153.
- Drucker D.C., Prager W.** Soil mechanics and plastic analysis or limit design // *Quarterly of Applied Mathematics* – 1952 – Vol. 10 (2) – P. 157–165, doi: 10.1090/qam/48291.
- Gerbault M., Poliakov A.N., Daignieres M.** Prediction of faulting from the theories of elasticity and plasticity: What are the limits? // *Journal of Structural Geology* – 1998. – Vol. 20 (2). – P. 301–320, doi: 10.1016/S0191-8141(97)00089-8.
- Malyshev S.V., Khudoley A.K., Glasmacher U.A., Kazakova G.G., Kalinin M.A.** Constraining age of deformation stages in the south-western part of Verkhoyansk fold-and-thrust belt by apatite and zircon fission-track analysis // *Geotectonics*. – 2018. – Vol. 52 (6). – P. 634–646, doi: 10.1134/S0016852118060055.
- Nikolaevskii V.N.** Governing equations of plastic deformation of a granular medium // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 1971. – Vol. 35 (6). – P. 1017–1029, doi: 10.1016/0021-8928(71)90106-7.
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I.** Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). – MAIK Nauka/Interperiodica, Moscow, 2001. – 571 p.
- Polyansky O.P., Babichev A.V., Reverdatto V.V., Sverdlova V.G., Korobeynikov S.N.** Numerical modeling of mantle diapirism as a cause of intracontinental rifting // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50 (6). – P. 839–852, doi: 10.1134/S1069351314060056.

- Prevost J.H., Loret B.** Dynamic strain localization in elasto-(visco) plastic solids, part 2. Plane strain examples // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1990. – Vol. 83. – P. 275–294, doi: 10.1016/0045-7825(90)90074-V.
- Rebetsky Yu. L.** Pattern of Global Crustal Stresses of the Earth // Geotectonics. – 2020. – Vol. 54 (6). – P. 723–740, doi: 10.1134/S0016852120060114.
- Ruh J.B., Kaus B.J.** Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belt: influence of rheology of single and multiple decollements // Tectonics. – 2012. – Vol. 31. – P. 1–23, doi: 10.1029/2011TC003047.
- Schmalholz S.M., Podladchikov Y.Y.** Viscoelastic Folding: Maxwell versus Kelvin Rheology // Geophysical Research Letters. – 2001. – Vol. 28 (9) – P. 1835–1838, doi: 10.1029/2000GL012158.
- Stefanov, Yu. P.** Deformation localization and fracture of geomaterials: Numerical simulation // Physical Mesomechanics. – 2002. – Vol. 5. – P. 103–114.
- Stefanov Y.P., Tataurova A.A.** Effect of friction and strength properties of the medium on shear band formation in thrust structures // Physical Mesomechanics. – 2019. – Vol. 22 (6) – P. 463–472, doi: 10.1134/S1029959919060031.
- Stefanov Y.P., Bakeev R.A.** Formation of flower structure in a geological layer at a strike-slip displacement in the basement // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2015. – Vol. 4. – P. 535–547, doi: 10.1134/S1069351315040114.
- Stockmal G.S., Beaumont C., Nguyen M., Lee B.** Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts: Insights from numerical models // GSA Special Paper. – 2007. – Vol. 433. – P. 63–98, doi: 10.1130/2007.2433(04).
- Tataurova A., Stefanov Y., Suvorov V.** Effect of changing basal friction on the formation of thrust // Trigger Effects in Geosystems. – Springer, Cham, 2019. – P. 169–177, doi: 10.1007/978-3-030-31970-0_19.
- Wilkins M.L.** Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin–Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1999. – 246 p.
- Wu G., Lavier L.L., Choi E.** Modes of continental extension in a crust wedge // Earth and Planetary Science Letters. – 2015. – Vol. 421. – P. 89–97, doi: 10.1016/j.epsl.2015.04.005.
- Yakovlev F.L.** Reconstruction of the balanced structure of the eastern part of Alpine Greater Caucasus using data from quantitative analysis of linear folding – case study // Bulletin KRAUNTS. Earth Sciences. – 2012. – Vol. 1 (19). – P. 191–214.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ТАТАУРОВА Антонина Андреевна – научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геомеханическое моделирование, напряженно-деформированное состояние геосреды.

СТЕФАНОВ Юрий Павлович – д.ф.-м.н., профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: исследования в области геомеханики; разработка моделей, описывающих поведение горных пород за пределом упругости, включая процессы необратимой деформации и формирования зон локализации, численного исследования деформационных процессов в земной коре.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2022 г.,
принята к публикации 14 ноября 2022 г.