

УДК 539.3, 551.24

Влияние трения и прочностных свойств среды на формирование зон локализации деформации в надвиговых структурах

Ю.П. Стефанов^{1,2}, А.А. Татаурова¹¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055, Россия

В рамках модели тектонического клина выполнено численное исследование формирования разломных структур в условиях надвига. Предложен вариант модели с изменением трения между подошвой слоя и жестким основанием в ходе развития необратимой деформации. Получен ряд характерных для зон надвига деформационных структур и определены условия, обеспечивающие их формирование. Выделен диапазон значений коэффициента трения, при котором проявляется его влияние на общее строение надвиговых структур. Показаны области зарождения, а также основные конфигурации разломных структур в зависимости от параметров среды и условий трения в основании. Зарождение зон локализации возможно как в основании слоя, так и на поверхности, в областях неровности рельефа, а также во фронтальной части зоны развития пластической деформации. Получено, что формирование листрических разломов происходит в основании слоя в среде с низкой сдвиговой прочностью. В среде с высокой прочностью возможно зарождение полос локализации у поверхности слоя. Проведенные расчеты показали, что основными факторами, определяющими общую конфигурацию деформационной структуры и строение разломов надвиговой зоны, являются прочностные характеристики среды и трение между деформируемым слоем и жестким основанием. Моделирование процессов деформации осуществлялось путем решения системы уравнений динамики упругопластической среды с использованием явной численной схемы в постановке плоской деформации. Поведение среды описано при помощи модели с предельной поверхностью Друкера–Прагера и неассоциированным законом течения. Учитывалось упрочнение и разупрочнение среды в ходе развития пластической деформации.

Ключевые слова: пластическая деформация, локализация пластической деформации, разлом, листрический разлом, надвиговые структуры, складчато-надвиговые пояса, трение, внутреннее трение, сдвиговая прочность, геосреда, осадочный слой, тектонический клин

DOI 10.24411/1683-805X-2018-15005

Effect of friction and strength properties of the medium on the formation of strain localization zones in thrust structures

Yu.P. Stefanov^{1,2} and A.A. Tataurova¹¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia² Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

The formation of fault structures under thrusting conditions has been studied within the framework of a tectonic wedge model. A variant of the model was proposed which involves friction changes between the layer base and a rigid foundation during irreversible deformation. Some specific deformation structures typical for thrust zones were revealed, and their formation conditions were estimated. The range of friction coefficient values was determined in which the friction coefficient has a general effect on thrust structures. The nucleation sites and the main patterns of fault structures were demonstrated depending on the parameters of the medium and friction conditions at the base. The localization zones can appear both at the layer base and on the surface, in rugged topography regions or at the front of the plastic deformation zone. It was found that listric faults are formed at the layer base in a medium with low shear strength. A possible scenario for a high-strength medium is the nucleation of localization bands near the layer surface. The calculations showed that the main factors governing the overall pattern of the deformation structure and the structure of faults in the thrust zone are the strength characteristics of the medium and friction between the deformable layer and the rigid base. The deformation processes were modeled by solving a system of equations of the dynamics of an elastoplastic medium using an explicit numerical scheme in plane strain. The behavior of the medium was described by a model with the Drucker–Prager yield surface and the nonassociated flow rule, with account for hardening and softening of the medium during plastic deformation.

Keywords: plastic deformation, plastic strain localization, fracture, listric fault, thrust structures, fold and thrust belts, friction, internal friction, shear strength, geomedium, sedimentary layer, tectonic wedge

1. Введение

Одним из объектов, привлекающих внимание исследователей, являются надвиговые деформационные структуры различных амплитуд, образующихся в зонах сжатия. Складчато-надвиговые пояса представляют наиболее яркий пример геологических объектов с надвиговыми структурами, который входит в состав горных систем и располагается на их периферии.

Считается, что складчато-надвиговые пояса формируются в результате срыва осадочного чехла с фундамента платформы и его сокращения в результате больших горизонтальных деформаций, вызванных сжатием тектонических плит. Это приводит к образованию дислокационных нарушений хрупких пород верхней коры: шарьяжей, взбросов, чешуйчатых надвигов и линейных складок. Разломообразование в этих зонах представляет собой сложный тектонический процесс, для которого характерны длительные периоды накопления напряжений, а также затяжные стадии пластического течения [1]. Падение разломных зон чаще всего направлено в сторону горных систем, что связано с условиями процесса деформирования. Примерами подобных объектов могут служить складчато-надвиговые пояса Загроса [2, 3], Альп [4, 5], Скалистых гор [6], Урала [7, 8], Верхоянья [9–11], Кавказа [12] и др.

Наличие запасов полезных ископаемых делает данные объекты стратегически важными для изучения [13]. В пределах складчато-надвиговых поясов ведутся работы по добыче углеводородов и ценных минеральных ресурсов, в том числе драгоценных и редкоземельных металлов.

Для всех складчато-надвиговых поясов характерны клиновидная форма и скольжение по разлому, отделяющему деформированную осадочную толщу от малодеформируемого фундамента. На основе этих данных была предложена модель критического клина или «бульдозера» [14–16], которая в первом приближении описывает геометрию, поведение и эволюцию пояса. Такая модель получила широкое распространение как в физическом, так и в численном моделировании [17, 18].

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию складчато-надвиговых поясов, остаются вопросы, связанные с условиями их формирования и причинами, приводящими к скольжению по разломам, а также распределению напряженно-деформированного состояния внутри этих зон. Одним из основных вопросов в исследовании закономерностей строения складчато-надвиговых поясов является объяснение формирования детачмента (субгоризонтального разлома между осадочной толщей и фундаментом) и особенностей скольжения по нему деформируемого верхнего слоя [15, 19]. Скольжение происходит вдоль пород с пониженной прочностью, например эвапоритов [16, 20], водонасыщенных глин [21].

Очевидно, что существенную роль в формировании структур играют особенности фрикционного скольжения деформируемого слоя, которое определяется закономерностями изменения трения аналогично скольжению на разломах. Экспериментальные данные по изучению фрикционных процессов показывают сложные нелинейные закономерности изменения трения в зависимости от скорости скольжения, величины смещения и других условий [22, 23], а также неоднородности его распределения в зоне контакта. При больших смещениях трение бортов разлома приводит к изменению свойств вещества.

К настоящему времени одним из основных подходов в исследовании геомеханических процессов, в том числе происходящих внутри литосферы и тектонических структур земной коры, стало численное моделирование [19, 24–32]. Описание поведения геологической среды в зависимости от конкретных процессов осуществляют в рамках разных реологических моделей: упруговязких, упруговязкопластических, упругопластических и др. [19, 25, 27, 28, 33, 34].

При моделировании геологических процессов главной проблемой является недостаток знаний об исходных параметрах, т.к. данные о строении коры различных регионов распределены неравномерно и содержат неполную информацию о физико-механических свойствах пород, в первую очередь, реологических и прочностных характеристиках. Кроме того, при постановке задач часто приходится опираться на умозрительные модели и гипотезы об условиях деформирования. Таким образом, возникают проблемы, связанные с наличием множества неопределенностей об условиях нагружения и реологических свойствах среды. Поэтому часто наиболее ценными в исследовании геомеханических процессов оказываются решения, полученные в рамках достаточно простых формулировок задач, которые, несмотря на множество неопределенностей о природном процессе, позволяют воспроизвести общее строение деформационной структуры и выявить важнейшие особенности деформирования, рассмотреть роль различных факторов.

Целью настоящей работы является выявление основных факторов, определяющих формирование деформационной структуры и разломов, в рамках простой модели тектонического клина. Для этого численно исследовано влияние трения в основании деформируемого слоя и прочностных параметров среды на зарождение и развитие зон локализации пластической деформации и образование разломной структуры.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим задачу о деформировании фрагмента однородного слоя геосреды клиновидной формы, лежащего на жестком основании (рис. 1). Слой находится



Рис. 1. Модель фрагмента складчато-надвигового пояса с граничными условиями

под действием гравитации, его верхняя граница горизонтальна и свободна от напряжений. Нижняя граница наклонена под углом порядка 1.5° . Между деформируемым слоем и жестким основанием действует трение. Деформирование слоя задается смещением левой границы. Решение задачи будем осуществлять для условий плоской деформации.

Такие условия соответствуют модели тектонического клина, мощность которого увеличивается по направлению к горной системе. Считается, что деформация и смещение границы клиновидного слоя происходит за счет давления со стороны горной системы. Этот факт подтверждается данными GPS [35] и видом деформационных структур, наблюдаемых в природе и в лабораторных экспериментах.

При данных масштабах исследуемой области действие силы тяжести оказывает большое влияние на напряженно-деформированное состояние среды и развитие процессов в ней. Поэтому решение задачи проведем в два этапа. На первом этапе необходимо рассчитать начальное напряженное состояние, обусловленное гравитацией. Расчет напряжений будем осуществлять при условии отсутствия горизонтальных перемещений на боковых границах расчетной области.

В случае упругости напряженное состояние можно легко вычислить:

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

где $\xi = \nu/(1-\nu)$, ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность среды. Однако уже на этом этапе нагружения, начиная с некоторой глубины, возможен переход среды в пластическое состояние. Это приведет к изменению горизонтальных компонент напряжений в соответствии с законом, описывающим поведение среды за пределом упругости. Вертикальные напряжения останутся прежними, т.к. они определяются весом вышележащей породы.

Следующим этапом решения будет расчет напряженно-деформированного состояния уже нагруженного слоя среды при смещении его левой боковой границы, где мощность слоя наибольшая, как показано на рис. 1: $u_x(x_1, z) = u(t)$. Скорость смещения достаточно мала и не оказывает существенного влияния на развитие процесса. На правой границе фрагмента клина будем сохранять постоянные значения горизонтальных напряжений, которые получены на первом этапе расчета: $\sigma_{ij}(x_2, z, t) = \sigma_{ij}(x_2, z, t = 0)$. Такие условия имитируют

его продолжение и не препятствуют деформации на границе при изменении напряжений внутри расчетной области.

При описании смещений в разломных зонах используют различные варианты модели rate-and-state. Однако в нашем случае, при отсутствии необходимых параметров, рассмотрим процесс в рамках наиболее простых вариантов закона трения без учета скорости смещения. Принимая простейший закон трения на контакте между деформируемой средой и жестким основанием, запишем

$$|\sigma_\tau| \leq -k^{\text{fr}} \sigma_n, \quad (2)$$

где σ_τ , σ_n — касательная и нормальная компоненты напряжений; k^{fr} — коэффициент трения. При $|\sigma_\tau| < -k^{\text{fr}} \sigma_n$ имеет место полное сцепление: $u_\tau = 0$. При $|\sigma_\tau| = -k^{\text{fr}} \sigma_n$ возможно смещение вдоль основания. Очевидно, что в процессе фрикционного скольжения эффективное трение на поверхности ограничено сдвиговой прочностью породы и при высоких его значениях начинается сдвиговое разрушение приповерхностного слоя, который по мере дробления в дальнейшем становится смазкой, снижающей трение. Опишем это простым соотношением

$$k^{\text{fr}}(\gamma^p) = k_0^{\text{fr}} (1 - (\gamma^p - \gamma^1)/\gamma^2) \quad (3)$$

для $\gamma^1 \leq \gamma^p \leq \gamma^2$, где γ^p , γ^1 и γ^2 — соответственно интенсивность сдвиговой пластической деформации, величина деформации начала и завершения снижения трения вследствие дробления породы. При этом задается минимальное значение коэффициента трения k_1^{fr} .

Для описания поведения среды будем использовать модель упругопластической деформации с учетом упрочнения и разупрочнения вследствие накопления повреждений с предельной поверхностью Друкера–Прагера [36]. Модели такого типа описывают необратимую деформацию горных пород в режимах хрупкого и вязкого сдвигового разрушения. Согласно принятой модели, будем считать, что скорость деформации d_{ij} состоит из суммы упругой и пластической (неупругой) частей:

$$d_{ij} = d_{ij}^e + d_{ij}^p. \quad (4)$$

Компоненты тензоров скоростей деформаций d_{ij} определяются соотношениями Коши: $d_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i})$. Напряженное состояние среды рассчитывается 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; $\theta = d_{kk}$. Для проведения расчетов удобно записать все соотношения для шаровой и девиаторной частей тензоров в виде

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu \left(d_{ij} - \frac{1}{3} d_{kk} \delta_{ij} \right), \quad (5)$$

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik} \dot{\omega}_{jk} - s_{jk} \dot{\omega}_{ik}, \quad (6)$$

$$\dot{\sigma} = -K\theta,$$

Таблица 1

Параметры модели, описывающие поведение среды осадочного слоя								
ρ , г/см ³	K , ГПа	μ , ГПа	Y_0 , МПа	α	β	γ^* , %	h	γ_0 , %
2.37	0.208	0.117	5–20	0.1–0.6	0.1	0.01	0.5	0.5

где K и μ — модули сжатия и сдвига соответственно; $\sigma_{ij} = -\sigma\delta_{ij} + s_{ij}$, где $\sigma = -\sigma_{kk}/3$ — среднее давление; s_{ij} — компоненты девиатора тензора напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; $\dot{\omega}_{ij} = 1/2(u_{i,j} - u_{j,i})$. Здесь использована коротационная производная Яуманна, которая учитывает возможность поворота элементов среды как целого.

Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния

$$f(\sigma_{ij}, \gamma^p) = 0, \tag{7}$$

где f — уравнение предельной поверхности; γ_p — интенсивность сдвиговой пластической деформации. При достижении напряжениями предельной поверхности начинается процесс неупругого, пластического деформирования, или разрушения. Пластическая деформация определяется в соответствии с уравнениями предельной поверхности и пластического потенциала:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}}, \quad G(\sigma_{ij}, \epsilon^p) = 0, \tag{8}$$

где G — пластический потенциал; $d\epsilon_{ij}^p$ — приращения компонент пластической (неупругой) деформации.

Уравнение предельной поверхности модифицированной модели Друкера–Прагера–Николаевского [33, 34, 36–38] запишем в виде

$$f = \tau - \alpha\sigma - Y, \tag{9}$$

где α и Y — параметры, которые могут быть выражены через коэффициенты внутреннего трения и когезии. Интенсивность касательных напряжений

$$\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}. \tag{10}$$

Пластический потенциал для расчета приращений пластической деформации запишем в виде

$$G = \tau - \beta\sigma, \tag{11}$$

β — коэффициент дилатансии.

Упрочнение и разупрочнение среды опишем соотношением

$$Y(\gamma^p) = Y_0[1 + h(A(\gamma^p) - D(\gamma^p))], \tag{12}$$

где h — параметр упрочнения, интенсивность сдвиговой пластической деформации рассчитывается через приращения $d\gamma^p = 2((de_{ij}^p)^2/2)^{1/2}$, $e_{ij}^p = \epsilon_{ij}^p - 1/3 \times \epsilon_{kk}^p \delta_{ij}$. Для учета упрочнения используется линейная зависимость $A(\gamma^p) = 2\gamma^p/\gamma^*$ и для учета разупрочнения (в результате накопления повреждений) — квадратичная: $D(\gamma^p) = (\gamma^p/\gamma^*)^2$, где γ^* — критическая деформация, после которой преобладает деградация материала. При достижении минимального заданного уровня на этапе разупрочнения сдвиговая прочность принималась

постоянной, соответствующей остаточной прочности материала: $Y^* = 0.5Y_0$.

Моделирование процесса деформации выполним путем численного решения системы уравнений динамики. Решение системы уравнений осуществлялось при помощи численной схемы [39]. Процедура решения и основные соотношения модели подробно изложены в [28, 34].

3. Результаты моделирования

Расчеты проводились на адаптированной сетке 750×52 для области размерами $X = 150$ км, $Z_1 = 10.5$ км на левой и $Z_2 = 7.7$ км на правой границах. Размеры области выбирались исходя из геологических представлений о размерах складчато-надвиговых поясов [10]. Параметры модели, описывающие поведение среды осадочного слоя, представлены в табл. 1. Для того чтобы избежать влияния больших пластических деформаций в области приложения нагрузки на левой границе, упрочнение среды задавалось существенно большим, чем в остальной части.

Расчет напряженного состояния, вызванного действием силы тяжести, показывает, что уже на первом этапе решения задачи возможен переход среды в упругопластическое состояние. С помощью простейших оценок легко определить глубину, на которой начинается пластическая деформация. Она определяется прочностными параметрами, коэффициентом Пуассона и плотностью среды. На рис. 2 приведены графики зависимости интенсивности касательных напряжений τ и эф-

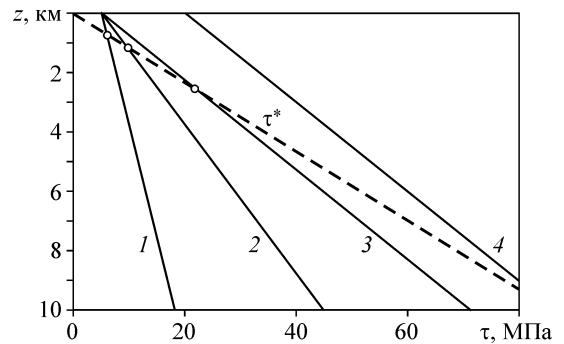


Рис. 2. Изменение интенсивности касательных напряжений и сдвиговой прочности с глубиной в зависимости от параметров модели: $\alpha = 0.1$, $Y_0 = 5$ МПа (1); $\alpha = 0.3$, $Y_0 = 5$ МПа (2); $\alpha = 0.5$, $Y_0 = 5$ МПа (3); $\alpha = 0.5$, $Y_0 = 20$ (4)

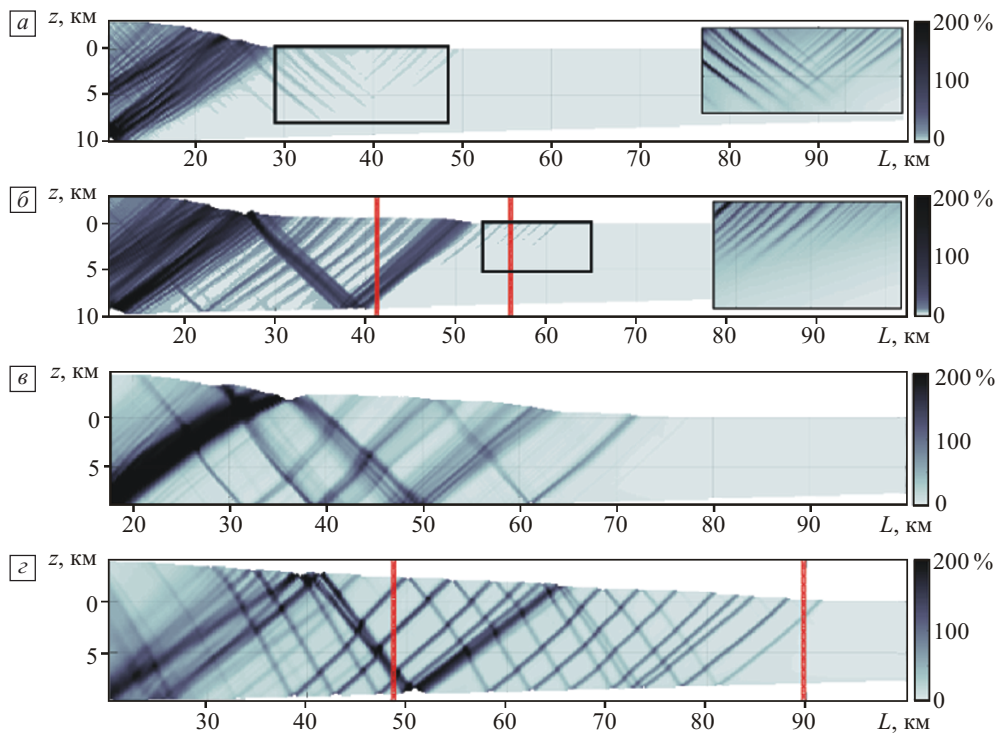


Рис. 3. Распределение интенсивности пластической деформации при постоянном трении в основании слоя: $\alpha = 0.5$, $Y = 10$ МПа, $k^{\text{fr}} = 0.2$ (а); $\alpha = 0.5$, $Y = 5$ МПа, $k^{\text{fr}} = 0.2$ (б); $\alpha = 0.3$, $Y = 5$ МПа, $k^{\text{fr}} = 0.15$ (в); $\alpha = 0.1$, $Y = 5$ МПа, $k^{\text{fr}} = 0.075$ (г)

фективной прочности τ^* от глубины при разных значениях коэффициента внутреннего трения и когезии в предположении, что состояние среды упругое. В рассмотренном случае с учетом уравнения (1) и данных табл. 1 получим $\xi = 0.357$. Соответственно, τ и τ^* будут определяться выражениями

$$\tau(z) = \frac{\sigma_z(x)}{\sqrt{3}}(1 - \xi), \quad \tau^*(z) = \alpha(1 + 2\xi) \frac{\sigma_z(x)}{3} + Y.$$

Пересечение прямых τ и τ^* определяет глубину перехода в неупругое состояние. Хорошо видно, что в рассмотренном случае пластическая деформация для $Y_0 = 5$ МПа начинается на глубинах $z \approx 0.7$ км, при $\alpha = 0.1$ $z \approx 1.1$ км, при $\alpha = 0.3$ $z \approx 2.6$ км, при $\alpha = 0.5$ $z \approx 2.4$ км. Для $Y_0 = 10$ МПа при $\alpha = 0.1$ $z \approx 1.5$, при $\alpha = 0.3$ $z \approx 2.3$, при $\alpha = 0.5$ $z \approx 5$. Начиная с данных глубин, напряженное состояние уже не будет описываться зависимостями (1), т.к. оно меняется после достижения предела упругости и определяется решением системы уравнений (4)–(12). Пластичность не возникает лишь при $\alpha = 0.5$ и $Y_0 = 20$. Таким образом, геологическая среда уже под действием силы тяжести может находиться за пределом упругости, что существенно образом влияет на характер развития процесса деформирования под действием дополнительных сил [27, 28].

Смещение левой границы расчетной области, согласно схеме нагружения (рис. 1), приводит к формиро-

ванию зон локализации, которые зарождаются у основания левой границы, и развивается к свободной поверхности (рис. 3, 5), что является типичным для деформирования тел с угловыми точками. Несмотря на смягчение условий нагружения при помощи более высокого упрочнения в примыкающей к границе области, полностью устранить ее влияние не удалось. Дальнейший характер деформирования зависит от прочностных свойств среды и условий трения в основании. Поскольку при описании поведения среды учитывалось изменение прочностных свойств в ходе пластической деформации, полосы локализации деформации интерпретируются как разломы.

При постоянном трении в основании слоя, в зависимости от указанных параметров, можно выделить несколько характерных картин деформирования. При высоком трении в основании смещение среды вдоль основания происходит лишь вблизи области приложения нагрузки. Происходит сокращение продольных размеров и утолщение слоя. Соответственно, деформация протекает лишь в данной области и не развивается по слою. По мере утолщения происходит образование нескольких полос локализации, иногда в виде веера с центром вблизи угловой точки в основании (рис. 3, а). При меньших значениях трения, когда возможно проскальзывание более протяженного участка, полосы локализации пластической деформации развиваются по мере утол-

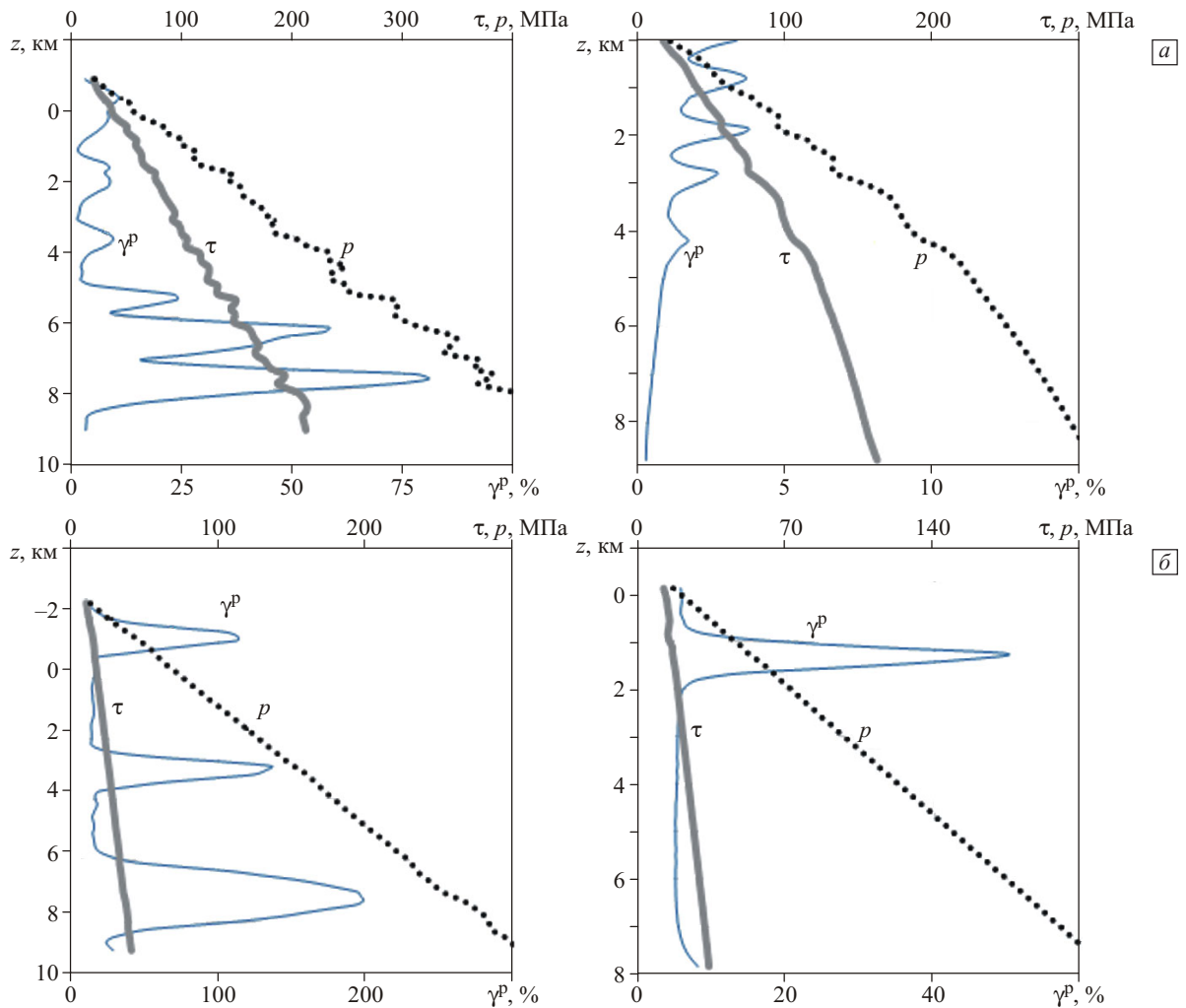


Рис. 4. Графики изменения интенсивности пластической деформации, интенсивности касательных напряжений и давлений с глубиной в двух сечениях для случаев рис. 3, б (а) и рис. 3, з (б)

щения слоя и изменения рельефа (рис. 3, б–з). Наличие боковой нагрузки приводит к изменению рельефа, наблюдаются поднятия в виде холмов, которые отмечаются в геологической среде в виде параллельных холмистых гряд. В этом случае картина деформирования сильно зависит от прочностных свойств слоя.

Серия расчетов для разных прочностных параметров среды при постоянном трении на подошве слоя ($k^{fr} = 0.075–0.6$) показала определяющее влияние внутреннего трения среды α на особенности зарождения и развития разломных зон. При низких значениях параметра $\alpha < 0.3$ разломные структуры в основном развивались от подошвы слоя (рис. 3, в, з), хотя место их зарождения часто определялось полосой локализации меньшей интенсивности, которая зарождалась на поверхности в местах искривления рельефа. Лишь при очень малом значении $\alpha = 0.1$ полосы локализации всегда зарождались в основании слоя.

При значениях параметра внутреннего трения $0.3 \leq \alpha < 0.5$ данные структуры зарождались на верхней границе слоя в передней части зоны деформирования (рис. 3, б), в зонах изменения рельефа, вызванного выходом на поверхность уже сформировавшихся разломов (рис. 3, б, в), а также на его подошве. В первом случае, когда полосы локализации зарождались на поверхности во фронте пластической деформации (рис. 3, б), на начальных этапах формирования они имели искривленную форму, с глубиной направление падения становилось более пологим. Во втором случае, когда зарождение зон локализации связано с изменением рельефа, они образуют два смежных разлома с разнонаправленным падением. На рис. 3 видно, что разломные зоны при повышении внутреннего трения становятся более симметричными, смежные разломы становятся равноценными, при этом их слияние происходит на подошве. Стоит отметить, что по данным физического моделирова-

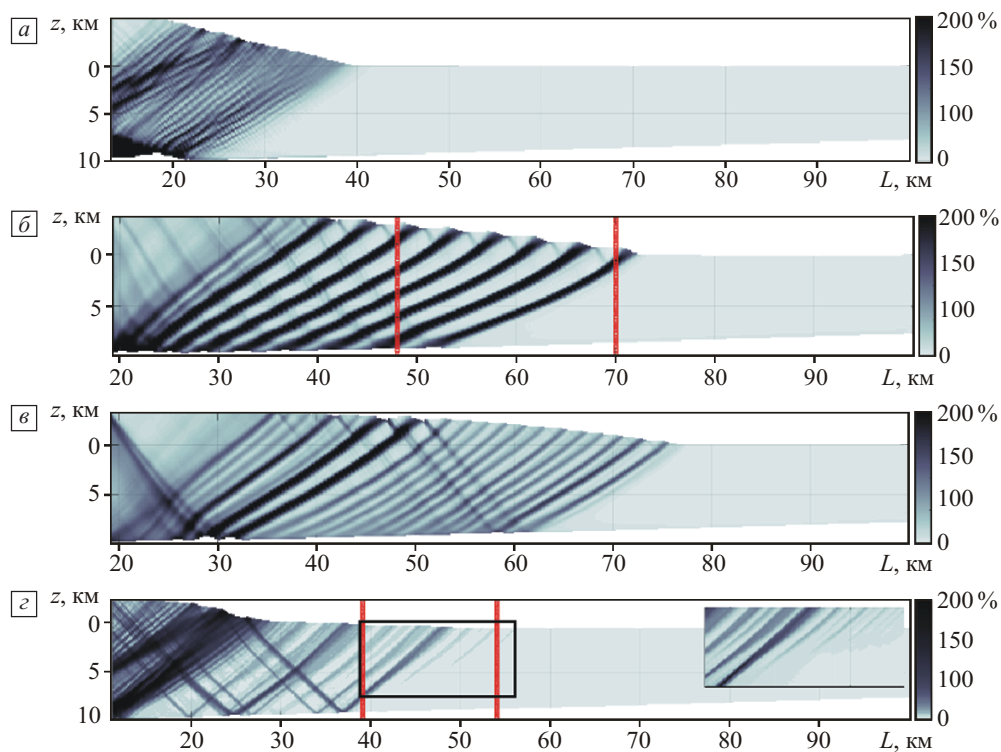


Рис. 5. Распределение интенсивности пластической деформации при понижении трения в ходе сдвига в основании слоя: $\alpha = 0.5$, $Y = 5$ МПа, $k^{\text{тр}} = 0.6$ (а); $\alpha = 0.1$, $Y = 5$ МПа, $k^{\text{тр}} = 0.15$ (б); $\alpha = 0.1$, $Y = 5$ МПа, $k^{\text{тр}} = 0.25$ (в); $\alpha = 0.5$, $Y = 10$ МПа, $k^{\text{тр}} = 0.2$ (г)

ния симметричную картину разломов обычно получают при условии, что смещение в основании происходит по вязкому материалу.

Близкую к листрической форму разломы имели лишь в области приложения нагрузки, где имелось сильное изменение рельефа, а также в передней части деформируемой области (рис. 3, б–г). В дальнейшем полосы локализации принимают близкую к прямолинейной форму. При значениях параметра $\alpha > 0.3$ зоны локализации деформации в основном зарождались на верхней границе слоя, имели листрический вид. В этом случае они не всегда развивались до подошвы слоя. На глубину их проникновения также оказывает влияние второй параметр уравнения (9), описывающий сдвиговую прочность Y . Если при $Y = 5$ МПа и $\alpha = 0.4, 0.5$ полосы локализации проникали лишь до середины слоя, то при $Y = 10, 20$ МПа они проникали почти до основания, сохраняя искривленный вид, близкий к листрическому.

Такая особенность зарождения и развития зон локализации объясняется вкладом слагаемых в уравнении предельной поверхности (9). При высоких значениях внутреннего трения с увеличением давления, а соответственно, и с глубиной имеет место быстрый рост сдвиговой прочности среды. Тогда в отсутствие концентраторов напряжений необратимая деформация развивается в первую очередь в областях, где прочность

имеет наименьшее значение, что может быть связано с низким уровнем давления. При небольших значениях внутреннего трения ($\alpha \leq 0.3$) влияние давления меньше. Соответственно, развитие пластической деформации больше зависит от интенсивности касательных напряжений, принимающих наибольшие значения вблизи подошвы.

При $\alpha \geq 0.5$, особенно при высоком трении в основании, разломные структуры часто имеют обратное направление падения, что меньше соответствует геологическому представлению о распределении деформационных структур в складчато-надвиговых поясах (рис. 3, а).

Серия расчетов показала, что вид деформационных структур при постоянном трении часто определяется закономерностями модели критического клина или угла [15], когда развитие деформации происходит лишь по мере утолщения слоя и определяется усредненным углом наклона поверхности. Однако в этом случае развитие деформации возможно лишь в узком диапазоне трения в основании. Трение в основании должно быть достаточно низким, в противном случае вся деформация оказывается сосредоточенной вблизи области нагружения. Тогда развитие надвиговых структур должно сопровождаться очень интенсивным ростом горных систем, что не наблюдается в природе. Такой характер деформирования больше соответствует лабораторным условиям, в которых деформация в основании не приво-

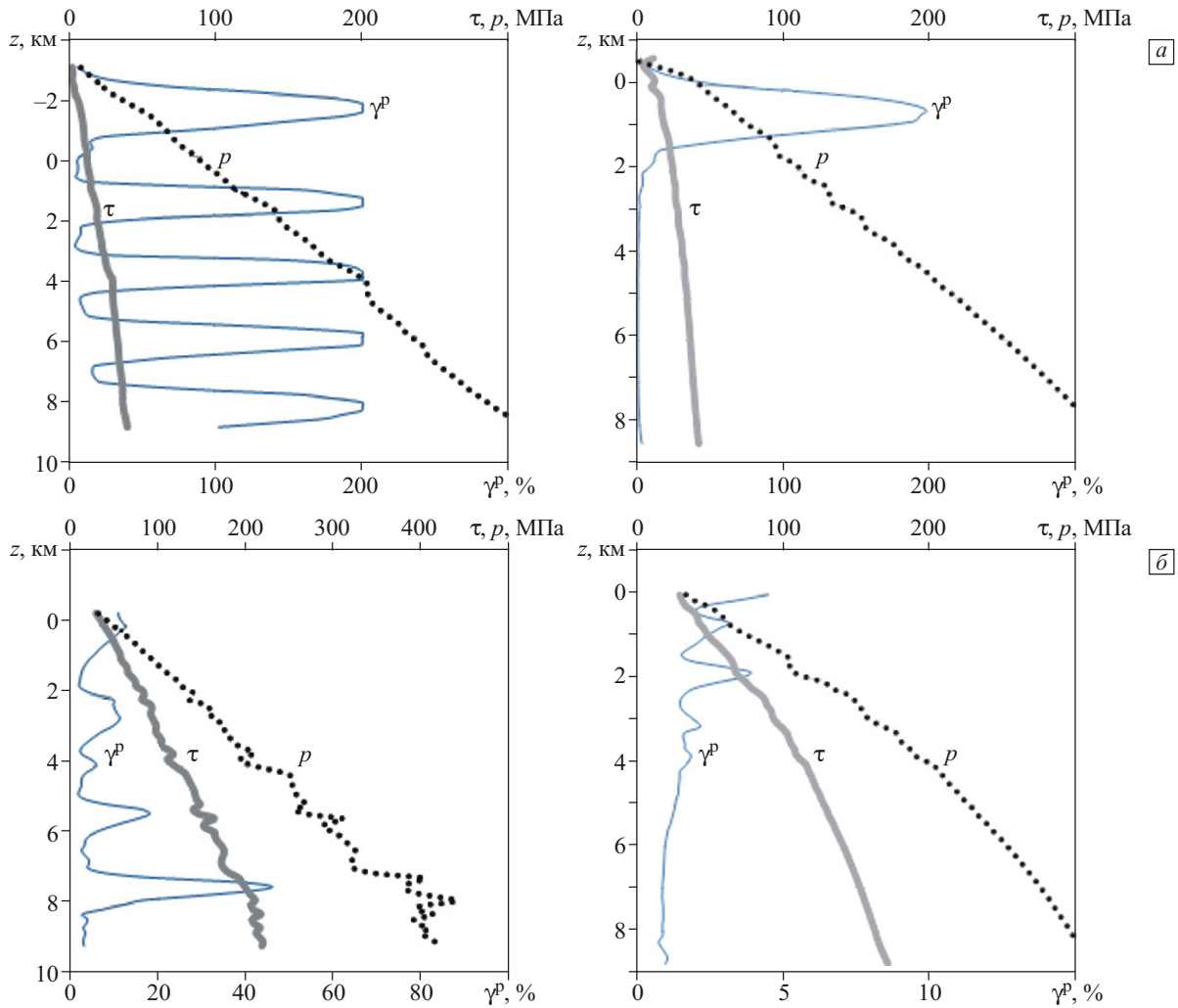


Рис. 6. Графики изменения интенсивности пластической деформации, интенсивности касательных напряжений и давлений с глубиной в двух сечениях для случаев рис. 5, б (а) и рис. 5, з (б)

дит к изменению свойств среды в основании, а вертикальные напряжения, связанные с гравитационными силами, не препятствуют большому утолщению слоя.

На рис. 4 показаны графики зависимости интенсивности сдвиговой пластической деформации от глубины в сечениях слоя, которые показаны на рис. 3, б, з. Первое сечение проходит через область со сформированными разломами, а второе — в передней части зоны пластической деформации, где полосы локализации лишь зарождаются. Здесь же приведены зависимости интенсивности касательных напряжений и давления. На рисунках хорошо видны участки, соответствующие полосам локализации деформации, и соответствующее напряженное состояние, в том числе в области зарождения разломов.

Следует отметить некоторое сходство закономерностей зарождения полос локализации в рассмотренных условиях с характером растрескивания покрытий и образованием полос локализованной пластической дефор-

мации в подложке [40]. Данное сходство обусловлено существенной ролью касательных напряжений, возникающих при продольном деформировании сопряженных материалов с разными физико-механическими характеристиками.

Учитывая, что смещения в основании природных структур могут принимать огромные значения, измеряемые сотнями и тысячами метров, в нем происходит измельчение породы, что приводит к изменению фрикционных свойств и образованию прослойки, обеспечивающей понижение трения. Опишем данный процесс при помощи простого соотношения (3), в котором трение снижается с ростом сдвиговой пластической деформации.

В результате учета изменения трения в ходе процесса расширился диапазон параметров, при которых развитие деформации происходит не только вблизи границы приложения нагрузки, но и по слою среды. Хотя не-

которые закономерности развития деформации остались прежними. Результаты расчетов показаны на рис. 5, 6.

Несмотря на учет изменения трения в основании слоя, при высоком его начальном значении характер развития деформации мало изменился, она оказывается сосредоточенной вблизи левой границы и не развивается по слою (рис. 5, а, 3, а) независимо от прочности среды. Аналогичная ситуация наблюдалась при высоких значениях прочностных параметров среды, результаты также оказались сходными при трении $k^{\text{fr}} = 0.2$ (рис. 5, з, 3, б). Основное различие заключалось лишь в несколько больших значениях коэффициента трения, при которых происходило развитие деформации по слою.

Наиболее существенное различие проявляется при $\alpha = 0.1$. В этом случае формируются разломы с выраженной листрической структурой (рис. 5, б, в), а вблизи основания происходит формирование субгоризонтального срыва. С продвижением разломных структур вдоль клина наблюдается изменение угла наклона разломов, они становятся более пологими. Причем формирование такого типа структур наблюдается и при достаточно высоких значениях начального коэффициента трения. При постоянном трении таких выраженных листрических разломов не возникало, причем при трении $k^{\text{fr}} > 0.1$ все деформация развивалась вблизи области нагружения.

На рис. 6 приведены зависимости интенсивности сдвиговой пластической деформации, интенсивности касательных напряжений и давления от глубины в сечениях слоя в виде, аналогичном рис. 4.

Таким образом, наибольшие различия в зарождении зон локализации и общем строении надвиговой структуры возникают в случае достаточно равномерного развития пластической деформации в основании слоя, что происходит при низком уровне прочности среды, в первую очередь при низком значении α . В остальных случаях развитие деформации протекает неравномерно, соответственно, также неравномерно происходит изменение трения на подошве. В результате эффект изменения трения в подошве сильно снижается.

На основе проведенных расчетов был получен ряд наблюдаемых в природе структур и сделаны оценки условий их формирования. В первую очередь, это формирование чешуйчатой системы разломов листрической формы. Такой тип разломной системы формируется при низкой сдвиговой прочности среды с зарождением разломов в основании клиновидного слоя.

4. Заключение

В рамках простой модели тектонического клина получен ряд наблюдаемых в природе надвиговых структур и сделаны оценки условий их формирования. Проведенные расчеты показали, что основными факторами, определяющими общую конфигурацию деформацион-

ной структуры и строение разломов надвиговой зоны, являются прочностные характеристики среды и трение между деформируемым слоем и жестким основанием.

Выделено три основных типа разломных структур:

1) Листрические разломы формируются в основании и развиваются по дуге к поверхности. Наиболее четко данная картина наблюдается в случае изменяющегося трения при низкой сдвиговой прочности среды. Очередная полоса локализации зарождается в области торможения скольжения. Образуется чешуйчатая структура разломов со ступенчатой формой рельефа.

2) Зигзагообразное развитие разломов наблюдается при высокой прочности среды. Очередная полоса локализации берет начало у поверхности на неровности рельефа и распространяется к основанию в направлении от области сжатия. После достижения основания происходит ее отражение и развитие к свободной поверхности. Причем интенсивность пластической деформации в этой части полосы значительно выше, чем в зародившейся у поверхности. Место ее выхода образует неровность рельефа и становится областью зарождения очередной полосы локализации деформации.

3) Полосы локализованного сдвига в среде с высоким внутренним трением и большим трением в основании слоя. Зарождение полос локализации происходит у поверхности слоя, нередко в двух направлениях. Значительная часть полос локализации имеет искривленный вид, приближаясь к листрическому. Данные полосы локализации не всегда проникают к основанию деформированного слоя. Глубина их проникновения зависит от прочностных свойств среды, в первую очередь скорости роста прочности с глубиной.

Влияние трения в основании слоя проявилось лишь в определенном диапазоне значений $0.075 \leq k^{\text{fr}} \leq 0.35$, при котором происходит смещение некоторого участка слоя вдоль поверхности слоя. При его меньших значениях деформация почти не развивается ввиду смещения всей клиновидной области. При больших значениях трения деформация сосредоточена в области, примыкающей к нагружаемой границе. Развитие деформации по слою происходит лишь по мере сильного продольного сокращения и утолщения. Причем в этом случае прочностные параметры перестают оказывать большое влияние на развитие процесса.

Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. по направлениям IX.128 и III.23.

Литература

1. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. – 359 с.
2. McQuarrie N. Crustal scale geometry of Zagros fold-thrust belt, Iran // J. Struct. Geol. – 2004. – V. 26 – P. 519–535.

3. Alavi M. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran // *Am. J. Sci.* – 2007. – V. 307. – P. 1065–1095.
4. Linzer H., Ratschbacher L., Frisch W. Transpressional collision structures in the upper crust: the fold-thrust belt of the Northern Calcareous Alps // *Tectonophysics.* – 1995. – V. 242. – P. 41–61.
5. Jourdon A., Rolland Y., Petit C., Bellahsen N. Style of Alpine tectonic deformation in the Castellane fold-and-thrust belt (SW Alps, France): Insights from balanced cross-sections // *Tectonophysics.* – 2014. – V. 633. – P. 143–155.
6. Price R.A. The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* – 1981. – V. 9. – P. 427–448.
7. Бачманов Д.М., Говорова Н.Н., Скобелев С.Ф., Трифионов В.Г. Неотектоника Урала (проблемы и решения) // *Геотектоника.* – 2001. – № 5. – С. 61–75.
8. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. – 280 с.
9. Парфенов Л.М. Разрывные дислокации Верхоянской складчатонадвиговой зоны и проблемы нефтегазоносности // *Геология и геофизика.* – 1985. – № 12. – С. 8–18.
10. Парфенов Л.М., Прокопьев А.В. Фронтальные надвиговые структуры Верхоянского складчатого пояса // *Геология и геофизика.* – 1993. – Т. 34. – № 7. – С. 23–34.
11. Khudoley A.K., Prokopiev A.V. Defining the eastern boundary of the North Asian craton from structural and subsidence history studies of the Verkhoyansk fold and thrust belt // *Geol. Soc. Am. Spec. Paper.* – 2007. – V. 433. – P. 391–410.
12. Яковлев Ф.Л. Опыт построения сбалансированной структуры восточной части альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* – 2012. – Т. 19. – № 1. – С. 5–12.
13. Cooper M. Structural style and hydrocarbon prospectivity in fold and thrust belts: A global review // *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* – 2007. – V. 272. – No. 1. – P. 447–472.
14. Chapple W. Mechanics of thin-skinned fold and thrust belt // *Geol. Soc. Am. Bull.* – 1978. – V. 89. – P. 1189–1198.
15. Dahlen F. Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges // *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.* – 1990. – V. 18. – No. 1. – P. 55–99.
16. Davis D.M., Engelder T. The role of salt in fold-and-thrust belts // *Tectonophysics.* – 1985. – V. 119. – P. 67–88.
17. Costa E., Vendeville B.B. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belt above weak, viscous evaporitic decollement // *J. Struct. Geol.* – 2002. – V. 24. – P. 1729–1739.
18. Stockmal G.S., Beaumont C., Nguyen M., Lee B. Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts: Insights from numerical models // *Geol. Soc. Am. Spec. Paper.* – 2007. – V. 433. – P. 63–98.
19. Ruh J.B., Kaus B.J., Burg J. Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belts: Influence of rheology of single and multiple decollements // *Tectonics.* – 2012. – V. 31. – No. 3. – TC3005.
20. Koyi H., Ghasemi A., Hessami K., Dietl C. The mechanical relationship between strike-slip faults and salt diapirs in the Zagros fold-thrust belt // *J. Geol. Soc.* – 2008. – V. 165. – No. 6. – P. 1031–1044.
21. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting // *Geol. Soc. Am. Bull.* – 1959. – V. 70. – No. 2. – P. 115–166.
22. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // *Физ. мезомех.* – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 5–15. – doi 10.24411/1683-805X-2013-00051.
23. Остапчук А.А., Салтыков Н.В., Мартынов В.С. Изменение кинематических параметров скольжения модельного разлома при медленных и быстрых деформационных событиях // *Физ. мезомех.* – 2017. – Т. 20. – № 6. – С. 29–39. – doi 10.24411/1683-805X-2017-00064.
24. Simpson G.D.H. Modelling interactions between fold-and-thrust belt deformation, foreland flexure and surface mass transport // *Basin Res.* – 2006. – V. 18. – P. 125–143.
25. Wu G., Lavie L.L., Choi E. Modes of continental extension in a crust wedge // *Earth Planetary Sci. Lett.* – 2015. – V. 421. – P. 89–97.
26. Chemenda A.I., Cavalie O., Vergnolle M., Bouissou S., Delouis B. Numerical model of formation of a 3D strike-slip fault system // *Tectonophysics.* – 2016. – V. 348. – P. 61–69.
27. Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Deformation and fracture structures in strike-slip faulting // *Eng. Fract. Mech.* – 2014. – V. 129. – С. 102–111.
28. Stefanov Y.P., Bakeev R.A. Formation of flower structure in a geological layer at a strike-slip displacement in the basement // *Izv. Phys. Solid Earth.* – 2015. – No. 4. – P. 535–547.
29. Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П. Структура и напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // *Геология и геофизика.* – 2006. – Т. 47. – № 10. – С. 1094–1105.
30. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квази-хрупких материалов и геосред // *Физ. мезомех.* – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 5–26. – doi 10.24411/1683-805X-2013-00032.
31. Григорьев А.С., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Высоцкий Е.М., Псахье С.Г. О влиянии динамических возмущений напряженного состояния на процесс накопления необратимых деформаций на границах раздела в блочных средах // *Физ. мезомех.* – 2015. – Т. 18. – № 4. – С. 24–37. – doi 10.24411/1683-805X-2015-00028.
32. Suvorov V.D., Stefanov Y.P., Pavlov E.V., Melnik E.A., Tataurova A.A., Kochnev V.A. Geomechanical conditions of the Tien Shan and Altai Orogeny // *Dokl. Earth Sci.* – 2017. – V. 476. – No. 2. – С. 1195–1199.
33. Стефанов Ю.П. Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование // *Физ. мезомех.* – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 107–118.
34. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // *Физ. мезомех.* – 2005. – Т. 8. – № 3. – С. 129–142.
35. Zubov A.B., Makarov V.I., Kuzikov S.I., Mosienko O.I., Щелочков Г.Г. Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии // *Геотектоника.* – 2007. – № 1. – С. 16–29.
36. 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.
37. Николаевский В.Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // *Механика твердых деформируемых тел. Итоги науки и техники.* – М.: ВИНТИ АН СССР. – 1972. – Т. 6. – С. 5–85.
38. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // *ПММ.* – 1971. – Т. 35. – № 6. – С. 1017–1029.
39. Wilkins M.L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. – Berlin: Springer-Verlag, 1999. – 246 p.
40. Гольдштейн Р.В., Панин В.Е., Осипенко Н.М., Деревягина Л.С. Модель формирования структуры разрушения в слое с упрочненными приповерхностными зонами // *Физ. мезомех.* – 2005. – Т. 8. – № 6. – С. 23–32.

Поступила в редакцию
13.08.2018 г.

Сведения об авторах

Стефанов Юрий Павлович, д.ф.-м.н., проф. РАН, внс ИНГГ СО РАН, снс ИФПМ СО РАН, yu_st@mail.ru
Татаурова Антонина Андреевна, нс ИНГГ СО РАН, anttat2@gmail.com