

ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.24.035

В.В. ГОНЧАР

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ
НА ОСНОВЕ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА

Асимметричные складки, развитые в зонах сдвигового течения, демонстрируют очевидные признаки проявления изгиба на этапе сжатия. Для их воспроизведения использован механизм продольно-поперечного изгиба в рамках теории нелинейного изгиба тонкого упругого стержня. Установлено, что развитие асимметричных складок определяется углом наклона действующей сосредоточенной силы и поступательным характером изменения угла. Рассмотрены две основные схемы развития складчатости: 1) в условиях линейной сдвиговой зоны, формирующей перегибные складки, 2) образование бесперегибных складок при минимальных усилиях.

До настоящего момента попытки моделирования асимметричных складок сводились к использованию кинематической схемы воздействия поля скоростей простого сдвига на слой, подходящий к зоне сдвига под разными углами [1, 3, 4]. Складкообразование здесь происходит на этапе геометрического сжатия вращаемых материальных линий (рис. 1, врезка); слой при этом играет пассивную роль маркера деформации в условиях сплошной однородной среды. Применение данной схемы приводит к воспроизведению *подобных* складок, признаки которых — полное совпадение геометрии слоев, а также изменение мощности в пределах короткого крыла: утолщение на стадии сжатия и утонение на стадии растяжения (рис. 1, врезка).

Реальные складчатые структуры несут следы совмещения двух основных механизмов: рассмотренного сдвигового течения и *изгиба* [3]. Образующиеся при чистом изгибе концентрические складки характеризуются постоянством мощности и изменением геометрии складки по кровле и подошве слоя. Использование таких признаков позволяет идентифицировать проявление изгибного механизма и в условиях линейных сдвиговых зон (рис. 1, а—б). Краткому освещению роли изгиба и его функционирования при формировании асимметричных складок, а также моделированию изолированной складчатости зон сдвига посвящена настоящая работа. В качестве основы в ней использованы элементы нелинейной теории упругого изгиба, разработанной Е.П. Поповым применительно к исследованию больших перемещений при изгибе тонкого стержня (полоски) [5], что соответствует плоской деформации. Механизм, воспроизводящий асимметричные складки, — *продольно-попе-*

речный изгиб под действием наклонной силы. Применение модели упругого слоя имеет ограниченное значение в отношении реальных геологических структур, обладающих сложным геологическим поведением. Подход с позиций упругого изгиба, тем не менее, может быть полезным при воспроизведении природных складок, учитывая получаемое сходство складчатых форм при упругом и упруго-вязком деформировании [7].

Складки изгиба в зонах сдвига: природные данные

Для выяснения роли изгиба при формировании асимметричных складок воспользуемся детально задокументированными примерами зон сдвига. На рис. 1, а и б показаны образцы криворожских железистых кварцитов, в которых компетентные кварцитовые слои смяты как в одиночные асимметричные складки, так и в их серии. Складки приурочены к линейным зонам (полосам) правостороннего сдвига, ориентированным по отношению к исходному условно-горизонтальному залеганию слоев под углами 20—40°. Отметим, что в рассматриваемых примерах хрупкие разрывы редки и наследуют складчатую деформацию, являясь вторичными элементами пластичных по существу зон сдвига. В первом образце (рис. 1, а) полоса сдвига слева (обозначена цифрой II) обладает большим масштабом перемещения бортов разлома и соответственно большими по амплитуде складками, чем полоса справа (I). В пределах последней складку «а», принадлежащую слою 3, следует рассматривать как образец начального развития более крупной складки «б» в пределах сдвиговой полосы II, принадлежащей тому же слою и зафиксированной уже на этапе растяжения.

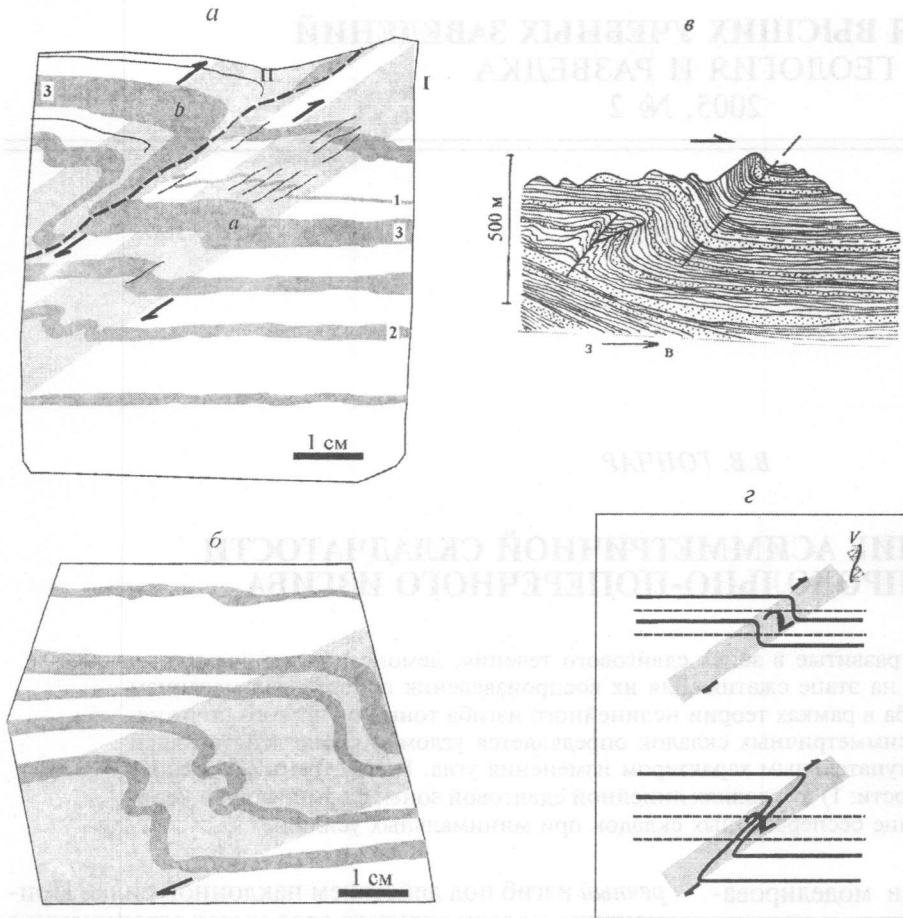


Рис. 1. Зарисовки природных асимметричных присдвиговых складок; на врезке: геометрическая модель деформации слоя в зоне неоднородного простого сдвига на стадиях сжатия (вверху) и растяжения: *a* – *б* – образцы криворожских железистых кварцитов (зарисовка керна); I–II – полосы сдвига, слои в которых находятся на стадиях сжатия (I) и растяжения (II); 1–3 – номера слоев, формирующих в зоне сдвига I различное количество складок в соответствии с зависимостью (1); *a* и *б* – складки слоя 3, принадлежащие различным полосам сдвига; *в* – складка-флексура в породах верхоянской серии (хребет Орулган, Западное Верхоянье [6]); *з* – врезка

Все отмеченные складки несут признаки изгиба, заключающиеся в особенностях формы. Для первого образца признаком изгиба является отсутствие подобия границ слоев, причем мощность в замках увеличивается довольно ощутимо (складки 2- и 3-го слоев), что говорит о комплексном проявлении изгиба и пластического течения. Слои на рис. 1, *б* обладали большей упругостью в процессе складчатой деформации, о чем свидетельствует преимущественное сохранение их мощности. Они характеризуются так называемой *бесперегибной* формой (так же, как и на рис. 1, *в*), когда кривизна длинного крыла складки не меняет свой знак. Кроме того, в средней части рис. 1, *б* присутствуют *перешатые* складки (в форме полуколец), являющие собой пример сохранения упругой реакции слоя при нарастающей деформации.

В представленных образцах железистых кварцитов в складки смяты слои различной мощности. На рис. 1, *а* выделены три слоя, для которых выявляется четкая зависимость между мощностью и количеством произведенных складок. Так, наименее мощный слой 1 содержит четыре микроскладки, напоминающие взбросо-антиклинали. Для слоя 2 фиксируются две складки, для которых разрывные нарушения не характерны. Наиболее мощный слой 3 смят в одиночную асимметричную складку. Указанная закономерность отражает известное правило, связывающее мощность слоя и длину волны [7]:

$$\lambda_w = 2\pi h \sqrt{\frac{G}{\sigma}},$$

где $\lambda_w = 2\lambda$, G – модуль сдвига.

Трудно объяснить с позиций чисто сдвиговой деформации послойные складки и флексуры, когда направление сдвига практически совпадает с ориентировкой слоев. Широко такие складки представлены, в частности, в Верхоянье [6] (рис. 1, *в*), где они обусловлены обстановкой несоосного пластичного растяжения [2]. Как видно, при существенной деформации мощность песчаниковых слоев практически не изменяется, что говорит о выраженном изгибе. Складки резко ограничены вверх и вниз по разрезу, что указывает на локализованные условия изгиба, связанные с неоднородностью послойного сдвигового течения.

Суммируя сказанное подчеркнем, что при достаточно контрастной вязкости слоев этап сжатия в зоне сдвига знаменует формированием не подобных, а изгибных асимметричных складок, которые в зависимости от мощности слоя могут формировать разномасштабные серии, образуя складчато-надвиговые парагенезисы, т. е. несут типичные признаки складчатости подвижных поясов. Данное подобие позволяет трактовать феномен присдвиговых складок, как это делалось в [3, 4], достаточно широко – как один из основных механизмов складкообразования в масштабе складчатых поясов.

Простейшие модели асимметричных складок

Особенности приложения усилий. Рассмотрим схему продольно-поперечного сжатия сосредоточенными силами тонкого упругого слоя, опирающегося на наклонную плоскость [5], что соответствует исследуемой обстановке сдвига (рис. 2, а). На свободный конец слоя, движение которого направляется наклонной плоскостью (плоскостью сдвига), действуют две силы: C — сдвигающая, параллельная плоскости сдвига, Q — сила реакции, перпендикулярная первой. Результирующей является сила P , действие которой приводит к изгибу слоя. Она направлена в общем случае наклонно по отношению к исходному горизонтальному залеганию слоя. Наклон P регулируется как соотношением C и Q , так и наклоном плоскости сдвига. Со стороны заделанного конца стержня действуют реактивная сила P' и момент M .

Особенностью развития данной силовой обстановки является то, что наклон силы P должен увеличиваться с ростом деформации за счет возрастания силы реакции опоры. Эффект разворота результирующей силы и постепенного увеличения угла ее наклона относительно исходно горизонтального положения непосредственно следует из модели линейной сдвиговой зоны. Особое состояние изгибной складки в полосе сдвига, когда ось перегиба оказывается перпендикулярной направлению сдвига, а осевая плоскость — параллельной ему (положение « d », рис. 2, б). В этой ситуации результирующая сила по направлению и величине должна совпадать с силой реакции опоры (бортов сдвиговой зоны), что в свою очередь означает равенство 0 силы C . Положение слоя можно трактовать как свободное от внешнего нагружения, когда механизм изгибной деформации не работает. Нельзя исключать, что после прохождения данной «нулевой точки» изгибная деформация может осуществляться в течение какого-то периода, однако она уже будет подчинена иным механизмам, в первую очередь — течению и разрывному смещению. Поэтому положение « d » можно рассматривать как вероятный момент прекращения изгибной деформации.

Модели одиночных складок. Можно представить серии состояний при упругом изгибе, когда каждая отдельная складка характеризуется определенным наклоном результирующей силы P и ее величиной. В силу того, что процесс упругого изгиба рассматривается как последовательность статических состояний равновесия, каждое промежуточное состояние при изменяющейся P , как и результирующее, не зависит от предыдущего [5].

Для расчета упругих кривых применялся метод, основанный на использовании эллиптических интегралов [5]. В его рамках уравнения координат точек упругой кривой имеют вид:

$$x' = \frac{2[E(\varphi) - E(\varphi_0)]}{\beta} - s, \quad (2)$$

$$y' = \frac{2k(\cos \varphi_0 - \cos \varphi)}{\beta}, \quad (3)$$

$$x = x' \cos \gamma + y' \sin \gamma; \quad y = y' \cos \gamma - x' \sin \gamma, \quad (4)$$

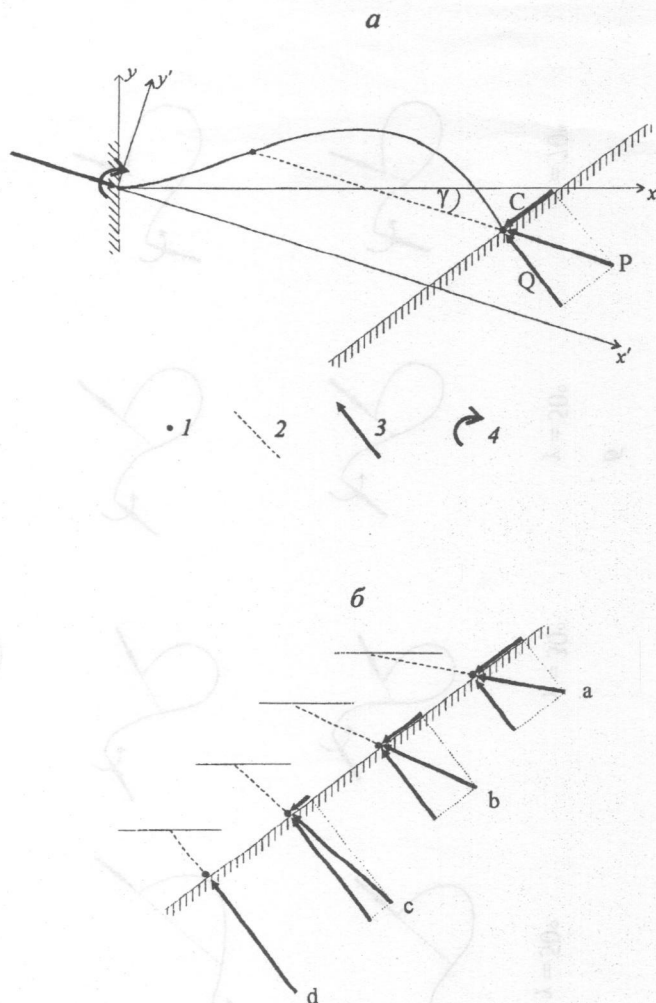


Рис. 2. Схема продольно-поперечного изгиба тонкого слоя (полоски) под действием сдвигающей силы C (а) и стадии изменения наклона результирующей силы P (б) (по [5] с дополнениями): Q — сила реакции опоры, γ — угол наклона результирующей силы; 1—2 — точки перегиба (1) и сжатия (2) на кривой изгиба, 3 — ось перегиба, направление действия сил, 4 — действие реактивного момента на заделанном конце слоя

где k и φ — параметры (модуль и амплитуда) эллиптических интегралов первого, $F(\varphi) = \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}}$,

и второго, $E(\varphi) = \int_0^{\varphi} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$, родов, описыва-

ющие форму упругой кривой; φ_0 — амплитуда в начальной точке; s — расстояние вдоль кривой единичной длины; x', y', x, y — координаты в относительной (связанной с направлением силы) и абсолютной системах координат (рис. 2, а). Величины эллиптических интегралов содержатся в типовых математических справочниках.

Важное определяющее значение имеет силовой коэффициент

$$\beta = \sqrt{\frac{Pl^2}{H}} = \frac{F(\varphi)}{s}, \quad (5)$$

где H — жесткость, l — длина изогнутой кривой. Эллиптический модуль и амплитуда связаны с углом наклона силы γ соотношением [5]:

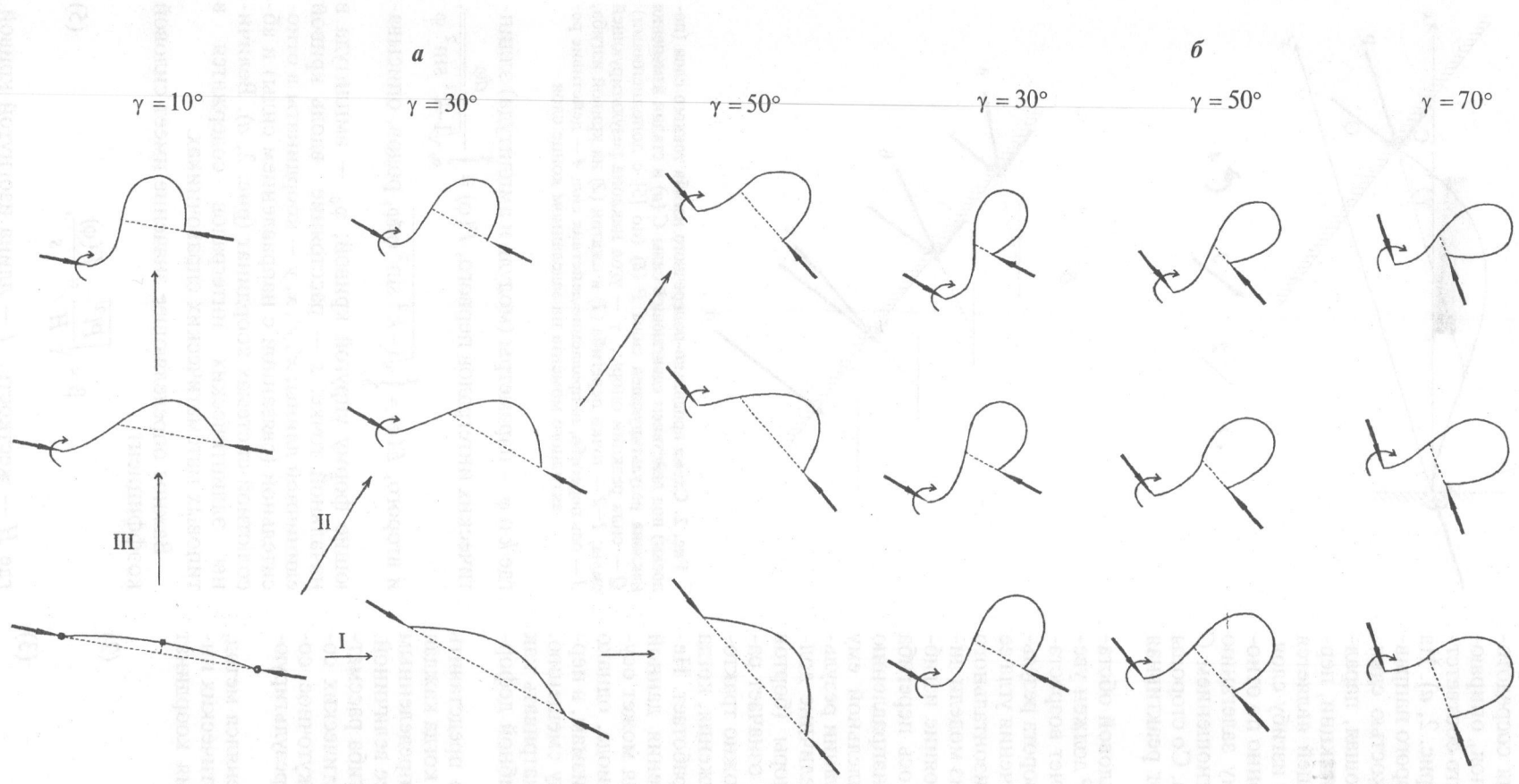


Рис. 3. Модели одиночных асимметричных упругих складок, полученные на основе метода эллиптических параметров: а — складки на начальных этапах деформирования, до стадии пережатия; I—III — возможные траектории эволюции одиночной складки; б — пережатые складки

асимметричных, складками с более выраженной асимметрией. Эта тенденция хорошо видна при воспроизведении серии складок сдвиговой зоны с $\alpha 40^\circ$ (рис. 5, а). Начальная деформация слоя, отвечающая траектории $\gamma 10^\circ$, выражена практически симметричной слабосжатой складкой. Отвечающая ей точка соответственно располагается на диаграмме вблизи нижней границы продольно-поперечного сжатия. На этом этапе складка не наминает флексуру. Типичная флексурная складка получается, когда траектория сдвига пересекает кривую $\gamma 50^\circ$ уже на заключительной стадии сжатия в зоне сдвига.

Диаграмма отображает неизбежность вращения направления сжимающей силы при формировании изгибных складок, связанных с зоной сдвига. Тем самым независимо подтверждается обсуждавшаяся нами выше схема эволюции условий нагружения в схеме сдвигания конца упругой полоски (рис. 2, б), в которой изменение наклона результирующей силы P происходит вследствие возрастания реакции опоры на увеличивающуюся деформацию. В определенный момент сила примет направление, перпендикулярное по отношению к плоскости сдвига, что будет означать состояние, в котором на слой не действует сдвигающая сила. В данной критической точке должно прекратиться действие изгиба (геометрически максимальное сжатие в соответствии с (7) при этом еще не будет достигнуто) и возможными окажутся иные механизмы деформирования, как течение или разрывообразование. В этой точке направление P совпадет с t (рис. 4, а), а угол наклона γ будет $90^\circ - \alpha$. Ось складки при этом совпадает с направлением сдвига. В соответствии с этим на диаграмму (рис. 4, б) нанесена траектория, отвечающая нулевым точкам для зон сдвига с разными углами наклона. Она может означать границу действия механизма изгиба, связанного с линейной зоной простого сдвига.

Признаком развития линейной сдвиговой зоны должны быть складки с точками перегиба на длинных крыльях, примыкающих к бортам зоны. Такие складки присутствуют в полосе сдвига I на рис. 1, а. Поэтому их можно предположительно считать развивавшимися по рассмотренной выше схеме линейной сдвиговой зоны, когда кинематика смещений при изгибе определялась фиксированным по-

ложением бортов зоны. Однако складки-флексуры на рис. 2, в, г демонстрируют бесперегибные внешние крылья, не свойственные линейной зоне. Следовательно, в этом случае необходимо предполагать иной тип смещений, соответствующий именно бесперегибным складкам. Траектория развития последних на диаграмме совпадает с начальными точками траекторий $\gamma = \text{const}$ (рис. 4, б). Соответствующий тип смещений (рис. 5, б) можно охарактеризовать как «набегающую волну» — на первом этапе преобладает субвертикальное вращательное движение крыльев, переходящее затем в горизонтальное, что также соответствует сдвиговой деформации, хотя схема движений отлична от таковой линейной зоны. Случай, когда бесперегибные флексурные складки выстраиваются в линейные зоны (рис. 2, б), возможно, говорит о том, что в процессе изгиба каждый слой следовал траектории, установленной для бесперегибных складок, а линейность складчатой зоны есть проявление «компромисса» между требованиями разноранговых элементов деформационного процесса: оформлением сдвиговой зоны и изгибом отдельных слоев.

Таким образом, обсуждаемая диаграмма носит более универсальный характер в отношении изгибной деформации и позволяет обсудить возможные сценарии ее развития, не связанные с линейной сдвиговой зоной, но подразумевающие некоторую суммарную деформацию сдвига — сжатие + вращение. С помощью диаграммы можно наметить отличные от модели линейной зоны траектории развития складок. Очевидным требованием для них должно быть возрастание величины деформации.

Обратим внимание на тип изменения силы, действующей при изгибе, обозначенный на рис. 4, б полем коэффициента β . Минимальные ее значения приурочены к началам траекторий изгиба, характеризуемым бесперегибной, флексурной формой складчатости. Деформационный процесс в этих случаях развивается по принципу минимальных затрат энергии. Таким образом, при прочих равных условиях бесперегибные наклонные складки относятся к наименее энергоемкому классу. Большие затраты энергии требуются для получения асимметричной перегибной складки. Наконец, максимальных усилий потребует формирование симметричных складок продольного сжатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинтов О.Б., Гончар В.В. Моделирование внутри- и приразломных складок в докембрийских комплексах с позиций несоосной прогрессивной деформации // Геофиз. журнал. 2004. № 2. С. 60–72.
2. Гончар В.В. О природе «зон пологих дислокаций» Верхоянской складчатой области // Отечеств. геология. 2004. №2. С. 63–69.
3. Паталаха Е.И. Генетические основы морфологической тектоники. Алма-Ата: Наука, 1981. 179 с.
4. Плотников Л.М. Структуры сдвига в слоистых геологических телах. Л.: Недра, 1991. 150 с.
5. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 294 с.
6. Борщиков И.М. Некоторые характерные особенности и природа складчатых дислокаций в пределах восточного крыла Западно-Верхоянского антиклинария // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1968. № 2. С. 85–92.
7. Schmalholz S.M., Podladchikov Yu. Buckling versus folding: importance of viscoelasticity // Geophys. Res. Lett. V. 26. 1999. P. 2641–2644.

Институт геофизики имени С.И. Субботина
НАН Украины, Киев
Рецензент — Н.Ю. Васильев