

А.П. ПОПОВ

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКЛАДЧАТОСТИ ПРОДОЛЬНОГО УКОРОЧЕНИЯ

В представленной модели каждый вычислительный компонент имитирует одну из важнейших составляющих природного складчатого процесса: сжатие слоистой толщи, распространение тангенциальных сжимающих напряжений по слою, давление вмещающей среды и ее сопротивление. В ходе модельного процесса устанавливается динамическое равновесие между разнонаправленными действиями компонентов, аналогичное равновесию между составляющими природного процесса. Модель воспроизводит основные складчатые формы и их сочетания, наблюдаемые в природе. Показано влияние баланса деформирующее воздействие — сопротивление среды на складкообразование.

Голоморфная складчатость [1], отличающаяся сплошным заполнением пространства складками, линейной вытянутостью складок, параллельностью их осевых поверхностей, одинаковой формой и размерами антиклиналей и синклиналей, образуется путем продольного укорочения слоистых толщ. Поэтому вслед за В.В. Эзом [7] будем называть ее складчатостью продольного укорочения.

Для компьютерного моделирования складчатости чаще всего используются методы конечных разностей и конечных элементов. Широко применяются разработанные на их основе коммерческие программы FLAC и MARC. Модели существенно детерминированные: задавая граничные условия и параметры среды, получаем однозначный результат. Поэтому такие модели часто привлекаются для изучения конкретных складчатых поясов [8, 9].

В противоположность такому подходу в настоящей работе поставлена цель: воспроизводить максимально широкий спектр типов, форм, сочетаний, систем складок, способных формироваться в условиях продольного укорочения слоистой толщи, и попытаться попутно выяснить, каковы такие условия. Для этого нужна модель существенно стохастическая: пусть развивающийся модельный объект будет как бы предоставлен самому себе. В природной обстановке на процесс формообразования влияет случайное сочетание множества факторов. Представляется, что элемент случайности формально приблизит модельный процесс к его природному аналогу.

### Построение модели

Пусть недеформированная толща состоит из большого числа горизонтально залегающих слоев. Зададим прямоугольную систему координат. Пусть слоистая толща, сжимаясь, укорачивается в тангенциальном направлении по оси  $X$  и удлиняется в радиальном направлении по оси  $Y$ . В горизонтальном направлении по оси  $Z$  размер толщи не изменяется из-за дефицита пространства.

Чтобы исключить влияние краевых эффектов, придадим толще достаточно большую протяженность, а за процессом складчатости будем наблюдать на ограниченном срединном участке. Главное

упрощающее допущение, непосредственно относящееся к механизму складкообразования, основано на представлениях В.В. Эза [7]: складка формируется двумя основными движущими силами: давлением деформируемой вмещающей среды и изгибающим моментом, создаваемым тангенциальными сжимающими силами, приложенными к концам слоя.

Выделим мысленно маркирующий слой нулевой мощности, нерастяжимый, во всех направлениях однородный и изотропный. Примем, что свойство нерастяжимости придает слою жесткость, достаточную для передачи тангенциальных сжимающих напряжений к месту изгиба. Поскольку ЭВМ оперирует только с дискретной информацией, необходимо на непрерывной поверхности выделенного слоя наметить квадратную сеть точек. После этого деформация слоя в компьютерном варианте будет состоять в изменении координат точек.

Чтобы при этом имитировался именно изгиб слоя, а не что угодно, сеть точек должна унаследовать основные свойства замененной ею поверхности. Равенство расстояний между соседними точками придает сети однородность. Эти расстояния не изменяются в течение всего процесса складкообразования, т. е. сеть остается нерастяжимой, имитируя одновременно и жесткость слоя. Указанные свойства одинаково проявляются как по оси  $X$ , так и по оси  $Z$ , т. е. сеть изотропная.

В связи с дискретизацией непрерывной поверхности возникает проблема: как бы ни изменялось пространственное положение точек, их совокупность должна сохранять связность, имитируя непрерывность объекта-оригинала. Эта проблема тоже решается сохранением равенства расстояний между соседними точками.

Уточним: понятия «сжатие» и «укорочение» на первых порах будем относить только к слоистой толще в целом, а не к отдельному слою, так как вместе с толщиной укорачивается только проекция слоя на ось  $X$ , а площадь в первом приближении не изменяется (свойство нерастяжимости).

Сходство основных свойств сети точек и замененного ею непрерывного слоя обуславливает

взаимозаменяемость соответствующих терминов, а также термина «поверхность», и позволяет одновременно оперировать ими в ходе дальнейшего изложения.

### Вычислительные процедуры

Если тектонические деформации можно рассматривать как серию геометрических преобразований плоской поверхности, то деформация сети точек — это серия последовательных изменений координат точек. Компьютерная имитация складкообразования — процесс циклический. Цикл содержит несколько вычислительных процедур. Основные требования, предъявляемые к набору процедур: 1) в соответствии с основным допущением имитировать сжатие толщи, давление вмещающей среды и передачу тангенциальных сжимающих напряжений к месту дислокации; 2) сохранять свойства сети точек в продолжение всего эксперимента.

Чтобы исключить влияние краевых эффектов, вычисления проводятся для достаточно обширной площади, а на дисплей выводятся результаты по наблюдаемому срединному участку. Большая часть вычислений выполняется по рядам точек, вытянутым по направлению сжатия толщи, вдоль оси  $X$ . Для краткости такие ряды будем называть цепями точек. Рассмотрим вычислительные процедуры.

*Процедура сжатия толщи* сводится к малым сближениям концов цепей — импульсам сжатия.

*Процедура начального изгиба.* В каких местах деформируемой сети возникнут изгибы в начале сжатия заранее неизвестно, поскольку сеть однородная. В каждой цепи все точки качественно одинаковы. Ни одну из них нельзя назвать слабым звеном. Приходится использовать случайный выбор. Итак, следует первый импульс сжатия. Крайние точки цепи сближаются. Цепь должна изогнуться, так как ее длина не изменяется. Место и знак изгиба определяются генератором случайных чисел. Для простоты расчетов принято, что крылья изгибов прямые. Возможны  $(2n)^m$  вариантов размещения антиклинальных и синклиналильных изгибов (где  $n$  — число точек в цепи,  $m$  — число цепей в сети).

*Процедура уравнивания* восстанавливает равенство расстояний между соседними точками, утраченное в результате сближения крайних точек цепей. Окно уравнивания охватывает три точки цепи. Сначала уравниваются просветы между первыми тремя точками. Окно сдвигается дальше на один просвет. Процедура повторяется до конца цепи, затем в обратном направлении. Очевидно, такие действия имитируют распространение тангенциальных сжимающих напряжений по всему слою. А точность выполнения задания, зависящая от количества повторений процедуры, имитирует механические свойства слоя: высокая точность уравнивания — слой жесткий, низкая точность — слой пластичный.

*Процедура сглаживания.* Сглаживаются значения координат  $X$  и  $Y$  точек в каждом ряду, вытянутом по оси  $Z$ . Необходимость этой процедуры обусловлена изотропностью сети: свойство связности присуще рядам точек, вытянутым не только по

оси  $X$ , но и по оси  $Z$ . Точки не могут менять координаты вне зависимости от точек в соседних цепях. В экспериментах использованы сглаживающие многочлены различных степеней: уравнения прямой, параболы и другие, а также линейное сглаживание по пяти точкам [6].

Изменения координат точек различными процедурами приводят к изменению длин рядов точек как вдоль оси  $X$ , так и вдоль оси  $Z$ . Для их *корректировки* предусмотрена отдельная процедура. Значение координаты  $Y$  каждой точки изменяется в зависимости от величины и знака его отклонения от нуля, а также от величины ( $\Delta$ ) и знака отклонения длины ряда от первоначального значения:

$$Y_2 = Y_1 (1 - K \Delta), \quad (1)$$

где  $K$  — регулировочный коэффициент, индексы 1 и 2 при  $Y$  соответствуют исходному и скорректированному значениям. По существу длина ряда корректируется путем изменения амплитуды складок.

*Процедура натяжения цепи.* При математическом моделировании необходимо приближать профиль складки какой-нибудь подходящей линией. По внешнему сходству выбрана цепная линия. Как известно, форму этой кривой принимает гибкая тяжелая нерастяжимая нить, подвешенная за концы в двух точках. Точки «подвеса» нити, моделирующей профиль складок, располагаются в местах перехода от антиклиналей к синклиналям. Чтобы исключить влияние краевых эффектов, вычисления проводятся для удлиненной цепи, концы которой находятся за пределами наблюдаемого участка. А чтобы исключить даже косвенное влияние границ участка, длина ненаблюдаемых отрезков цепи задается генератором случайных чисел. В результате этой процедуры цепь точек натягивается, плавно изгибаясь, и, что важно, ее длина (наблюдаемая) изменяется незначительно, в среднем оставаясь постоянной.

Аналогия между профилем складки и цепной линией несет простой физический смысл. Цепная линия формируется под действием силы тяжести. А складка образуется не только передачей тангенциальных сжимающих напряжений по слою от его концов, но и в результате деформации вмещающей среды [7]. Укорачиваясь в тангенциальном направлении, слоистая толща удлиняется в радиальном направлении путем дифференциальных (вверх—вниз) перемещений вещества. Сминаемый слой испытывает давление со стороны ядра растущей складки. Такое давление — аналог силы тяжести. Если тяжелая цепь натягивается силой тяжести, то линия профиля складки натягивается давлением вмещающей среды. Именно последнее имитируется описанной вычислительной процедурой. Между прочим, простота аналогии обуславливает простоту вычислений, основанных на аналогии, что особенно важно при компьютерном моделировании.

Представленный набор вычислительных процедур удовлетворяет перечисленным выше требованиям, следовательно, достаточен для моделирования.

## Процесс моделирования и исследование модели

Начало модельному складчатому процессу дает последовательность процедур: сжатие толщи — начальные изгибы — сглаживание. Вначале образуются многочисленные изгибы, хаотически распределенные по площади. Под действием сглаживания они сливаются в немногие сквозные для ряда цепей изгибы. Дальнейший процесс моделирования складчатости состоит в циклическом повторении последовательности процедур: сжатие толщи — уравнивание — натяжение цепей — корректировка — сглаживание.

С одной стороны, описанные вычислительные процедуры противодействуют одна другой: каждая из них изменяет результат предшествующих вычислений в соответствии с собственной частной задачей. С другой стороны, они дополняют одна другую в решении общей задачи. Проверка показала, что их чередование дает сходящийся ряд результатов: последовательными приближениями создается складчатая структура, устойчивая при каждой степени сжатия толщи.

На стадии построения модели было введено жесткое условие — сохранение равенства расстояний между соседними точками сети. Это оправдалось тем, что, во-первых, всякая модель должна строиться на достаточно простых, строгих и четко сформулированных принципах. Во-вторых, отвечающее этим требованиям условие упрощало принципиально важную методическую операцию — наследование сетью точек свойств замкнутой ею поверхности. Вычислительные процедуры подобраны и настроены на выполнение этого условия.

Однако при групповой работе процедур, в ходе конкретного вычислительного эксперимента равенство расстояний между соседними точками сети, как правило, не сохраняется — несмотря на возможность управлять работой каждой процедуры. Правда, эта возможность ограничена. Большую роль играет фактор случайности. В начале каждого вычислительного эксперимента задаются значения управляемых переменных. Как будет развиваться складчатый процесс, предсказать невозможно, особенно при сглаживании многочленами высоких степеней. Многие модельные складчатые формы неповторимы.

В процедуре, корректирующей длины рядов точек вдоль оси  $Z$ , установлен эффективный регулятор — коэффициент  $K_z$  в (1). Аналогичный регулятор для оси  $X$  неэффективен, его действия нейтрализуются процедурой натяжения цепи. Регулируется скорость корректировки длин рядов, которая, в свою очередь, влияет на степень отклонения фактических длин рядов от первоначальной величины. Для контроля оцениваются средние по сети степени отклонения по осям  $X$  и  $Z$  —  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_z$ . Назовем их продольной и поперечной деформациями сети соответственно.

Поскольку длина проекции сети на ось  $Z$  в ходе деформации не изменяется (как и размер слоистой толщи), всякий наклон сети к горизонту в координатной плоскости  $YZ$ , даже локальный, сопровождается ее удлинением, т. е. величина  $\varepsilon_z$  всегда положительна. Длина сети в этом направлении про-

порциональна секансу угла наклона. Сеть удлиняется в результате неравномерных, дифференциальных движений точек: смежные точки в соседних цепях могут двигаться с разными скоростями, удаляясь одна от другой. Пример поперечного удлинения слоя — известное явление ундуляции шарниров складок (любая кривая, соединяющая две точки, длиннее прямой).

Корректирующая процедура противодействует дифференциальным движениям точек, стремясь устранить наклоны сети по принципу: чем больше отклоняется от нуля координата  $Y$  точки, тем на большую величину это отклонение уменьшается. Таким образом, эта процедура понижает  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_z$ . Напротив, процедура натяжения цепи способствует дифференциальным движениям точек, стремится придать цепям точек наибольшую длину, а складкам наибольшую амплитуду, т. е. повышает  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_z$ . Оказывается, ход модельного процесса во многом определяется противоборством этих двух процедур.

Продольное укорочение  $\eta$  слоистой толщи оценивали по формуле:  $\eta = A/B - 1$ , где  $A$  и  $B$  — расстояния между крайними точками сети по оси  $X$  в конце и в начале эксперимента соответственно.

В ходе экспериментов установлено, чем выше значение коэффициента  $K_z$  в (1), тем чаще и в большем количестве образуются мелкие складки (рис. 1, а). При подсчете складок в пределах наблюдаемого участка сети придерживались правила: полупериод синусоиды — одна складка, четверть периода — полскладки. При малых значениях  $K_z$  сеть иногда вообще не сминается, а наклоняется характерным образом, т. е. видимый участок сети оказывается частью крыла очень крупной складки.

Наиболее правдоподобным представляется следующее объяснение этой зависимости. Чем больше коэффициент  $K_z$ , тем сильнее корректирующая процедура препятствует отклонениям координат  $Y$  точек от нуля, а значит и росту складок, конфликтующих с процедурой натяжения цепи. Конфликт разрешается образованием более мелких и многочисленных складок. В изменившейся ситуации и цепи точек натягиваются как обычно, и отклонения координат  $Y$  от нуля невелики (из-за малой амплитуды складок), что удовлетворяет обе конфликтующие стороны. Конечно, это описание грубо и схематично. В действительности процесс развивается по тому или иному сценарию с начала вычислительного эксперимента. Прежде устанавливается динамическое равновесие между взаимоисключающими тенденциями в изменении координат точек.

Отклик модели на противоборство этих тенденций напоминает известную зависимость числа формирующихся складок от сопротивления вмещающей среды [7]. Это наводит на мысль, что противодействие корректирующей процедуры росту амплитуды складок есть не что иное, как имитация сопротивления вмещающей среды. Подведем некоторый итог. Если процедура натяжения цепи имитирует давление вмещающей среды на сминаемый слой со стороны ядра складки, то корректирующая процедура имитирует сопротивление, реакцию той же среды со стороны замка складки. А упомянутое выше подвижное равновесие по суще-

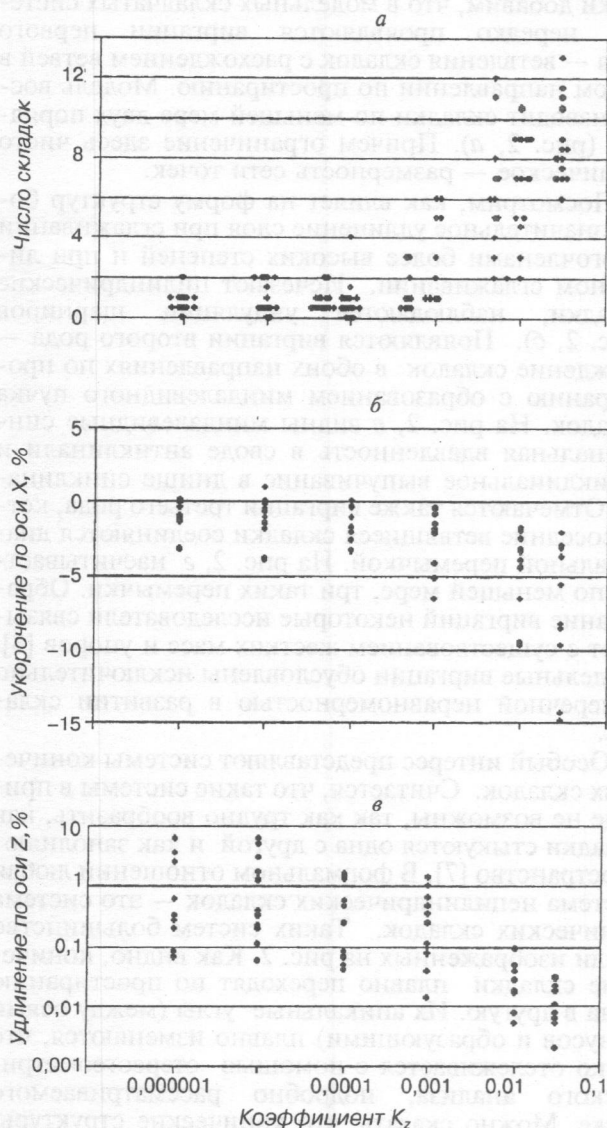


Рис. 1. Зависимость числа складок (а), величины продольного укорочения (б) и поперечного удлинения сети (в) от коэффициента  $K_z$ ; сглаживание прямой линией,  $\eta = -20\%$

ству имитирует баланс между деформирующей силой и сопротивлением, который и определяет величину деформации.

Если данное выше объяснение обсуждаемой зависимости раскрывает чисто вычислительную сторону вопроса, то новое представление позволяет объяснить явление в терминах физики. Пусть к замкам двух сопряженных складок приложены силы реакции среды. Тогда их составляющие, действующие вдоль общего крыла складок, будут играть роль сжимающих сил, способных вызвать изгиб крыла. По законам статики, при постоянной реакции среды, сжимающие силы будут тем больше, чем полнее крылья складок. Таким образом, дополнительная складка возникнет исключительно как результат реакции среды и притом скорее всего в начале складчатого процесса.

Суммарный результат вычислительных процедур таков, что в ходе складкообразования в продольном направлении, по оси  $X$ , сеть точек укорачивается и тем сильнее, чем больше коэффициент

$K_z$  (и сопротивление вмещающей среды) (рис. 1, б). Результат неожиданный, так как при построении модели предполагалось постоянство длин цепей в соответствии с известным фактом: нейтральная поверхность в слое ненулевой мощности не испытывает изменения по длине при изгибе. Однако в свете вышесказанного становится ясно, что это утверждение справедливо только для случая свободного изгиба в среде, не оказывающей сопротивления. В обсуждаемом случае сжимающие силы — составляющие реакции среды — создают в слое сжимающие напряжения и соответствующие им по закону Гука деформации укорочения. Если в природных системах величина деформации столь же мала, как и в модели (несколько процентов), то выявить такие деформации практически невозможно.

Установлено, что поперечное удлинение сети точек тем сильнее, чем меньше коэффициент  $K_z$  (и сопротивление вмещающей среды) (рис. 1, в). По существу в этой зависимости находит отражение баланс «деформирующее воздействие — сопротивление среды»: смещение равновесия в сторону большего сопротивления уменьшает деформацию.

Может сложиться впечатление, что укорочение сети точек в одном направлении компенсируется удлинением в другом и в итоге площадь сети не изменяется. Но из сопоставления рис. 1, б и в видно, что с ростом коэффициента  $K_z$  продольное укорочение сети увеличивается, а поперечное удлинение уменьшается, следовательно, площадь сети сокращается. Это подтверждается прямыми измерениями обсуждаемой величины.

Рассмотренные закономерности выявлены на структурах, сглаженных прямой линией. Но они проявляются также и на структурах более сложной формы. Независимость от вида сглаживающего уравнения придает закономерностям значение, фундаментальное для модели, а, возможно, и для моделируемого процесса. Правда, закономерности остаются количественно неполноценными, так как на рис. 1 не хватает градуировки оси абсцисс в значениях физической величины.

Вытекающие из результатов моделирования выводы не противоречат физическим законам, что повышает оценку адекватности модели.

Коэффициент  $K_z$  в (1), играющий столь важную роль в модели, не несет сколько-нибудь ясного физического смысла, как и его размерность —  $[L]^{-1}$ . В формальном аспекте он имеет чисто вычислительное значение — регулирует скорость корректировки координат точек. В содержательном плане, как показали проведенные исследования, корректирующая процедура имитирует сопротивление вмещающей среды, а указанный коэффициент регулирует это сопротивление.

Имитируя тонкие особенности процесса, модель предоставляет и средства управления. Перечень управляемых переменных (в скобках — имитируемые параметры моделируемого процесса): величина импульса сжатия (скорость сжатия слоистой толщи), степень продольного укорочения толщи, распределение начальных изгибов по площади, число повторений процедуры уравнивания (жесткость слоя), скорость корректировки длин рядов точек (сопротивление вмещающей среды),

величина растяжения цепей точек (давление вмещающей среды), вид сглаживающего уравнения. На рис. 2 показаны складки, смоделированные при различных значениях некоторых переменных.

### Форма модельных структур

Большое влияние на форму образующихся складок оказывает вид сглаживающего уравнения и величина поперечного удлинения сети. Конечно, последняя зависит от соотношения между деформирующим воздействием и сопротивлением среды, но ее удобнее использовать из-за легкости измерения. Исследуем, как в этой связи изменяется доля цилиндрических складок в структуре сминаемого слоя.

Предварительно уточним, какие складки при подсчетах должны учитываться как цилиндрические. Дело в том, что отмечены две группы модельных структур данной формы: 1) складки, остающиеся цилиндрическими на всем протяжении наблюдаемого участка слоя; встречаются среди структур, сглаженных прямой линией; 2) короткие цилиндрические участки в местах плавного перехода по простиранию одних конических складок к другим; встречаются среди структур, сглаженных параболой и кривыми более высоких порядков. Учитывая, что фигура с непрямыми непараллельными образующими — не цилиндр, следует исключить из рассмотрения структуры второй группы. Тогда область исследования будет охватывать только структуры, сглаженные прямой линией.

Были изучены 560 складок, из них 194 складки (35 %) цилиндрические (таблица). Зависимость изучаемой величины от степени сжатия толщи неясно выражена, во всяком случае, слабо. Вместе с тем наблюдается четкая зависимость: чем меньше поперечное удлинение слоя, тем больше доля цилиндрических складок. Учитывая рассмотренные выше закономерности, приходим к выводу: препятствуя удлинению слоя и свободному развитию складок, сопротивляющаяся среда создает стесненные условия, в которых предпочтительнее формируются цилиндрические складки. Причем степень продольного сжатия толщи на эти условия если и влияет, то слабо. Последний вывод хорошо согласуется с известным фактом, что среда легко приспособляется к прогрессирующему продольному укорочению слоистой толщи [7]. Это еще раз свидетельствует об адекватности модели.

Описанное соотношение структур складывается при поперечном удлинении слоя до 3 % и при сглаживании прямой линией. Для полноты характери-

стики добавим, что в модельных складчатых системах нередко проявляются виргации первого рода — ветвления складок с расхождением ветвей в одном направлении по простиранию. Модель воспроизводит складки по меньшей мере двух порядков (рис. 2, а). Причем ограничение здесь чисто техническое — размерность сети точек.

Посмотрим, как влияет на форму структур более значительное удлинение слоя при сглаживании многочленами более высоких степеней и при линейном сглаживании. Исчезают цилиндрические складки, наблюдаются ундуляции шарниров (рис. 2, б). Появляются виргации второго рода — схождение складок в обоих направлениях по простиранию с образованием миндалевидного пучка складок. На рис. 2, в видны миндалевидные синклиналиная вдавленность в своде антиклинали и антиклиналиное выпучивание в днище синклинали. Отмечаются также виргации третьего рода, когда соседние ветвящиеся складки соединяются диагональной перемычкой. На рис. 2, г насчитывается, по меньшей мере, три таких перемычки. Образование виргаций некоторые исследователи связывают с существованием жестких масс и упоров [3]. Модельные виргации обусловлены исключительно поперечной неравномерностью в развитии складок.

Особый интерес представляют системы конических складок. Считается, что такие системы в природе не возможны, так как трудно вообразить, как складки стыкуются одна с другой и как заполняют пространство [7]. В формальном отношении любая система нецилиндрических складок — это система конических складок. Таких систем большинство среди изображенных на рис. 2. Как видно, конические складки плавно переходят по простиранию одна в другую. Их апикальные углы (между осями конусов и образующими) плавно изменяются, что легко отслеживается с помощью стереогеометрического анализа, подробно рассматриваемого ниже. Можно сказать, что конические структуры стыкуются одна с другой посредством коротких соединительных «муфт» цилиндрического типа. Вкрест простирания складки сопрягаются столь же плавно и естественно. Представляется, что в таком виде рассматриваемые системы могут реализовываться в природе.

Конические складки сливаются одна с другой, образуя купола и мульды (рис. 2, д). Известно, что такие структуры могут формироваться при укорочении толщи вдоль слоистости одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях [7].

Изменение доли цилиндрических складок в структуре сминаемого слоя в зависимости от степеней продольного укорочения толщи и поперечного удлинения слоя

Продольное укорочение толщи, %	Степень поперечного удлинения слоя, %								
	0 — 0,05			0,05 — 0,5			> 0,5		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0 — 10	58	34	59	36	13	36	44	10	23
10 — 20	35	19	54	62	18	29	40	8	20
20 — 30	35	17	49	77	23	30	30	6	20
30 — 40	30	16	53	62	18	29	51	12	24

Примечание. У значений продольного укорочения толщи знак минус опущен, I — общее число складок, II — число цилиндрических складок; III — процент цилиндрических складок.

Модель воспроизводит такие структуры и при одноосном сжатии, но при дополнительном условии достаточно сильного поперечного удлинения слоя, т. е. при сильном смещении баланса деформирующее воздействие — сопротивление среды в сторону деформирующего воздействия. Остается вопрос, реализуются ли такие условия в природе.

Наконец, при очень сильном удлинении слоя (более 40 %) появляются продольные складки, ориентированные вдоль направления сжатия (рис. 2, е). По канонам структурной геологии, такие складки могут формироваться только при укорочении толщи вдоль оси Z.

Как видим, в модели действует мощный фактор формообразования — баланс между деформирующим воздействием и сопротивлением вмещающей среды. Этот фактор способен вызвать парадоксальную ситуацию, когда складчатость продольного укорочения формально перестает быть таковой, утрачивая свои главные отличительные черты — линейную вытянутость и параллельность складок.

Сглаживание выступает в модельном складчатом процессе сдерживающим фактором. Подобно сосуду, наполненному жидкостью и придающему ей свою форму, сглаживание сдерживает дифференциальные движения точек сети, но допускает в этом движении определенную неравномерность, позволяя ей принять конкретную форму, запрограммированную в сглаживающем уравнении.

Если сглаживающие многочлены обуславливают более или менее однородное удлинение слоя, то линейное сглаживание по ближайшим пяти точкам допускает удлинение неоднородное. В связи с этим воспроизведение моделью купольно-мульдовых структур можно истолковать еще и таким образом: позволяя сети неоднородно удлиняться, линейное сглаживание имитирует особо интенсивное воздействие вертикальных сил на отдельные участки слоя. При таком подходе получается почти классическая схема образования куполов [1] с той разницей, что в рассматриваемом случае имеет место еще и общее воздействие горизонтальных сил.

В целом геологическая трактовка вида сглаживания вкратце такова. Тот или иной вид сглаживания соответствует определенной степени связанности точек сети. Здесь просматривается прямая аналогия со степенью связанности частиц горной породы. Таким образом, степень сглаживающего многочлена приблизительно соответствует степени пластичности породы, изгиб слоев которой имитируется. Например, сглаживание прямой линией имитирует изгиб слоев жестких пород, таких как кварциты.

Модель сводит в единый непрерывный ряд разнотипные структуры. На одном конце ряда — линейные, цилиндрические складки, на другом — прерывистые складки — купола и мульды. Промежуток перекрывается коническими складками,

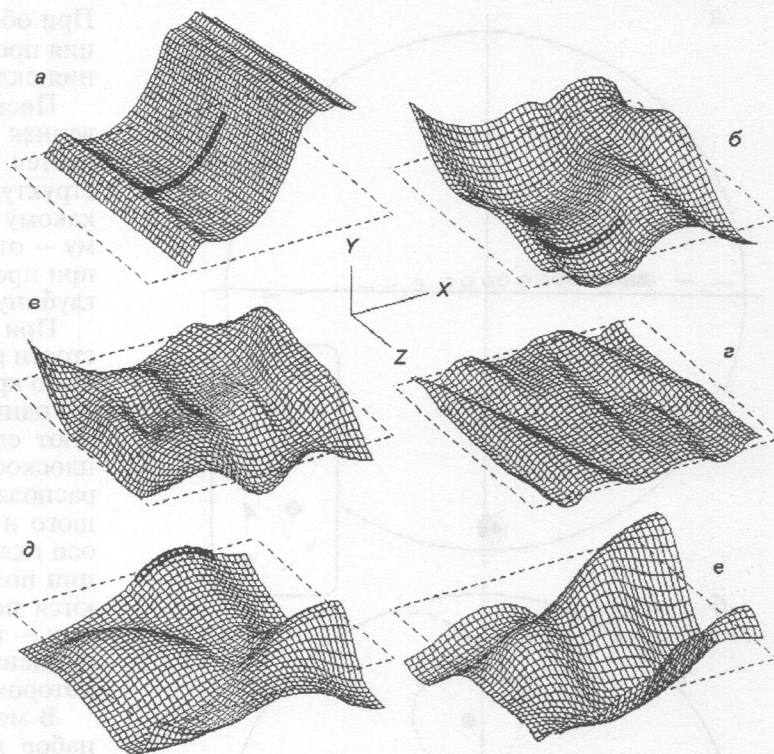


Рис. 2. Складчатые структуры, смоделированные при различных значениях управляемых переменных ( $n$  — степень сглаживающего многочлена): а —  $n$  1,  $\eta$  -30 %,  $\epsilon_x$  -2,3 %,  $\epsilon_z$  0,7 %; б —  $n$  7,  $\eta$  -15 %,  $\epsilon_x$  -3,3 %,  $\epsilon_z$  6,2 %; в —  $n$  10,  $\eta$  -16 %,  $\epsilon_x$  -4,6 %,  $\epsilon_z$  5,6 %; г — линейное сглаживание,  $\eta$  -15 %,  $\epsilon_x$  -6,4 %,  $\epsilon_z$  1 %; д — линейное сглаживание,  $\eta$  -7,5 %,  $\epsilon_x$  -0,6 %,  $\epsilon_z$  10,8 %; е — линейное сглаживание,  $\eta$  -12 %,  $\epsilon_x$  -0,8 %,  $\epsilon_z$  42,6 %; выделены ячейки сети, для которых определена пространственная ориентировка; пунктир — первоначальное положение сети

причем полностью, «без зазора» — благодаря изменению апикальных углов в широких пределах.

Различая объекты по признаку существования, можно отметить, что модель воспроизводит объекты существующие, в том числе наблюдаемые и ненаблюдаемые, и объекты несуществующие, в том числе возможные и невозможные. К ненаблюдаемым объектам можно отнести некоторые системы конических складок, к невозможным — продольные складки.

#### Стереометрический анализ модельных складок

Согласно методическим основам [2, 4, 5], для полного стереометрического исследования складчатой структуры любого типа необходим и достаточен массив данных о пространственной ориентировке трех категорий линейных элементов: полюсов слоистости,  $\beta$ -пересечений, ранней линейности.

Под  $\beta$ -пересечением понимается линия пересечения смежных замеренных плоскостей слоистости; ранняя линейность — линейные элементы, более ранние, чем рассматриваемые складки, но синхронные слоистости, деформируемой этими складками.

Расчет пространственной ориентировки линейных элементов, нанесение их проекций на стереограмму, определение их траекторий рассеивания и осей вращения делает ЭВМ. Ориентировку слоистости машина определяет по координатам трех ближайших точек, не лежащих на одной прямой.

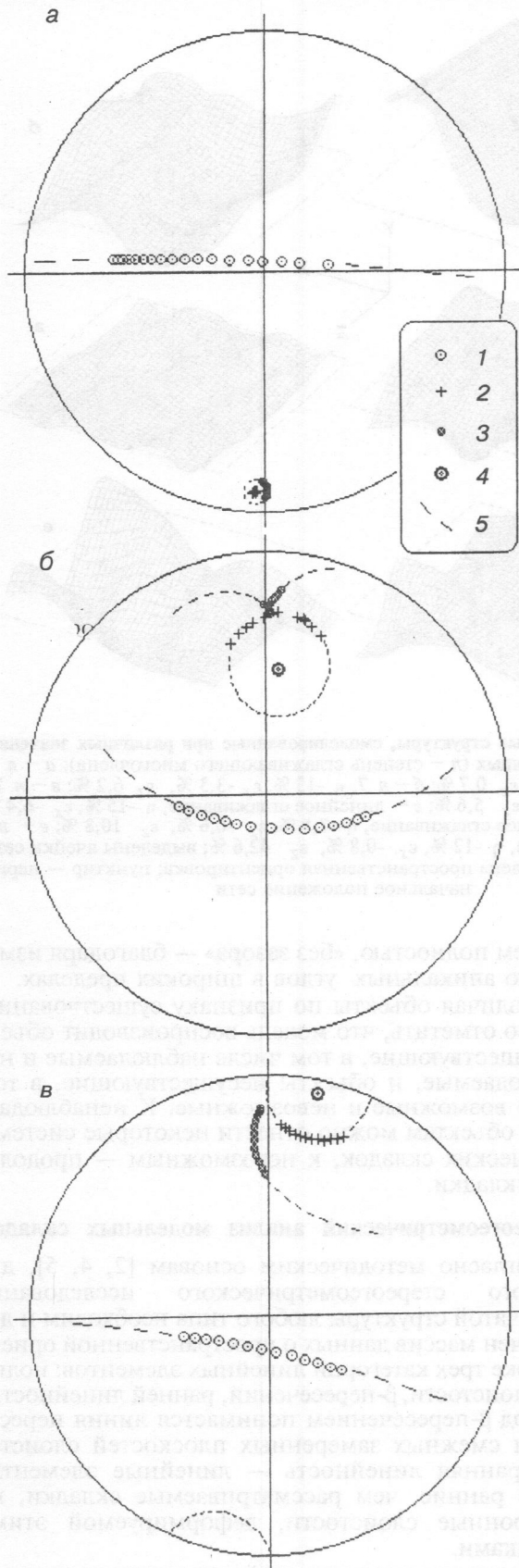


Рис. 3. Стереограммы складок, изображенных на рис. 2, а (а), 2, б (б) и 2, д (в); сетка Вульфа, проекция на верхнюю полусферу: 1 — полюса слоистости, 2 —  $\beta$ -пересечения, 3 — ранняя линейность, 4 — оси вращения, 5 — траектории рассеивания

При обследовании конкретной складки эта операция проводится в ряде ячеек сети вкрест простирания складки.

Поскольку в разнотипных складках пространственная ориентировка структурных элементов меняется по-разному, при расшифровке складчатой структуры изучаемого района важно определить, к какому типу — цилиндрическому или коническому — относится складка. Это знание полезно также при прослеживании складок по простиранию и на глубину.

При цилиндрической деформации полюса слоистости рассеиваются на стереограмме по дуге большого круга,  $\beta$ -пересечения статистически параллельны одни другим и оси складки, их проекции образуют единый максимум концентрации в полюсе плоскости большого круга; ранняя линейность располагается по дуге малого круга. Центры большого и малого кругов совпадают и соответствуют оси складки (рис. 3, а). При конической деформации полюса слоистости и  $\beta$ -пересечения рассеиваются по дугам малых кругов, общий центр которых — проекция оси конуса, а ранняя линейность концентрируется вдоль дуги эвольвенты круга<sup>1</sup>, по которому рассеиваются  $\beta$ -пересечения (рис. 3, в).

В модельных складках обнаруживается полный набор линейных элементов. Причем имитатором ранней линейности служат ребра ячеек сети, ориентированные вдоль оси Z. На стереограмме их проекции концентрируются так же, как и ранняя линейность, в соответствии с тем, что описанными законами. Поэтому в дальнейшем данный элемент модельных складок будем для краткости называть ранней линейностью.

Чем меньше апикальный угол конуса, тем больше коническая складка внешне походит на цилиндрическую; соответственно меняются и узоры рассеивания линейных элементов на стереограмме. Наступает момент, когда коническая складка уже не отличается от цилиндрической. Разброс отсчетов на стереограмме (вследствие наложенных деформаций или погрешностей замеров элементов залегания, произведенных горным компасом в полевых условиях) усугубляет неопределенность, вследствие чего среди природных конических складок можно уверенно распознавать лишь достаточно «тупые» структуры с апикальными углами не менее  $10^\circ$ .

При идентификации складок целесообразно оперировать понятием круга неопределенности. Проекция  $\beta$ -пересечений на стереограмме располагаются либо цепочкой, либо хаотически. В первом случае можно отнести складку к коническому типу и определить ее параметры. Во втором случае этого сделать нельзя, приходится считать складку цилиндрической, даже если в действительности она коническая. Воображаемый круг, ограничивающий область хаотического группирования  $\beta$ -пересечений, — это круг неопределенности, а его радиус — радиус неопределенности. Кругу неопределенности на стереограмме соответствует конус неопределенности в пространстве.

Исходя из сказанного выше, для природных складок радиус неопределенности можно оценить в  $10^\circ$ .

<sup>1</sup> В действительности эта кривая только приближается к эвольвенте круга при  $\alpha \rightarrow 0$  ( $\alpha$  — апикальный угол конуса), полностью совпадая с ней лишь в пределе.

Многие складки с меньшими апикальными углами вынужденно считаются цилиндрическими. По этой причине роль цилиндрических деформаций в природных системах может преувеличиваться.

Машинные определения ориентировки слоистости в модельных складках значительно точнее «ручных» замеров элементов залегания, произведенных горным компасом на природных складках. Соответственно меньше разброс отсчетов на стереограмме и круг неопределенности. Благодаря этому даже без анализа ранней линейности среди модельных складок уверенно распознаются конические структуры со значительно меньшими апикальными углами — до  $1,5^\circ$ . Стереометрический анализ использован в описанном выше исследовании роли разных типов деформаций в модельных структурах. К цилиндрическим отнесены те складки, чьи апикальные углы меньше радиуса неопределенности  $1,5^\circ$ .

Ранняя линейность — наименее изученный аспект стереометрии складок, особенно конических. Модель предоставляет хорошие условия для исследований в этой области: исходные данные в неограниченном объеме, «чистота» деформаций, точность измерений, обеспечивающие четкую картину рассеивания линейных элементов на стереограмме.

При конической деформации ранняя линейность концентрируется вдоль дуги эвольвенты круга. В тех случаях, когда некоторые элементы линейности ориентированы параллельно  $\beta$ -пересечениям, наблюдается особая точка кривой — точка возврата (рис. 3, б). Ее наличие усложняет картину рассеивания и может затруднить анализ природных складок, когда разброс отсчетов весьма велик.

Из трех категорий линейных элементов у ранней линейности наблюдаются наименьшие отскоки точек от расчетных траекторий: точки образуют наиболее ровные цепочки на стереограмме. Это дает возможность отличать дугу малого круга от эвольвенты круга и, следовательно, использовать раннюю линейность для еще более тонкого различения типов складок, для дальнейшего уменьшения радиуса неопределенности.

В построенной модели каждый вычислительный компонент (процедура) имитирует одну из важнейших составляющих природного складчатого процесса: сжатие слоистой толщи, распространение тангенциальных сжимающих напряжений по слою, давление вмещающей среды и ее сопротивление. В ходе модельного процесса устанавливается динамическое равновесие между разнонаправленными действиями компонентов, аналогичное равновесию между составляющими природного процесса.

Модель воспроизводит складки цилиндрические и конические, линейные и прерывистые, разнорядковые, системы конических складок, виргации всех трех известных родов, ундуляции шарниров, раннюю линейность. Иными словами, модель воспроизводит основные складчатые формы и их сочетания, наблюдаемые в природе, что свидетельствует об адекватности.

Изучено влияние баланса деформирующее воздействие — сопротивление вмещающей среды и вида сглаживающего уравнивания на модельный складчатый процесс.

Эвристическая сила модели измеряется количеством порождаемой ею новой, не заложенной при построении информации. Установлено, что с ростом сопротивления вмещающей среды слой сильнее укорачивается в продольном направлении, но меньше удлиняется в поперечном направлении, значительно сокращается его площадь, растет доля цилиндрических складок, а также общее количество складок в структуре сминаемой слоистой толщи. Доля цилиндрических складок слабо зависит от степени сжатия толщи.

Идея о сопротивлении вмещающей среды не была изначально заложена в модель. Не совсем понятно, почему она имитирует это свойство среды. Возможная причина — нацеленность некоторых компонентов модели на сохранение свойств сети точек в ходе складкообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. М.: Госгеолтехиздат, 1954. 606 с.
2. Казаков А.Н. Деформация и наложенная складчатость в метаморфических комплексах. Л.: Наука, 1976. 238 с.
3. Косыгин Ю.А. Тектоника. Изд. 2-е. М.: Недра, 1983. 536 с.
4. Попов А.П. Стереометрическая система складок // Геология и геофизика. 1985. № 3. С. 19–26.
5. Флаас А.С. Геометрия конической складки // Принципы и методы изучения структурной эволюции метаморфических комплексов. Л.: Наука, 1978. С. 112–117.
6. Шелест А.Е. Микрокалькуляторы в физике. М.: Наука, 1988. 272 с.
7. Эз В.В. Складкообразование в земной коре. М.: Недра, 1985. 240 с.
8. Strayer L.M., Hudleston P.J. Numerical modeling of fold initiation at thrust ramps // J. of Structural Geology. 1997. V. 19. P. 551–566.
9. Wissing S.B., Pfiffner O.A. Numerical models for the control of inherited basin geometries on structures and emplacement of the Klippen nappe (Swiss Prealps) // J. of Structural Geology. 2003. V. 25. P. 1213–1227.

Национальный парк «Самарская Лука»  
Рецензент — В.Н. Вадковский