

УДК 551.243.3

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ В СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ ПО ДИСГАРМОНИЧНЫМ СКЛАДКАМ

Ф. Л. Яковлев

Содержание. Предлагается методика получения абсолютных величин деформации в складчатой области по дисгармоничным складкам. Методика основана на механизме образования складок за счет действия комбинаций изгиба, сплющивания и скальвания. Рассматриваются результаты применения методики в части флишевого синклинория Южного склона Большого Кавказа. Проводятся сопоставления с измерениями по коэффициенту избыточной длины слоя.

Для количественных оценок деформаций можно использовать малые тектонические формы — оолиты, конкреции, будинаж, складки. С их помощью выясняются ориентировки осей сжатия и растяжения, относительные, а иногда и абсолютные деформации, которые отражают общую деформацию толщи в месте, где эти формы встречены. Однако общие причины возникновения складчатости только такими исследованиями выявить нельзя.

Известно, что первоначально пласты занимали горизонтальное положение и их мощность выдерживалась на некотором расстоянии. Зная это, в принципе возможно по складкам определять характер деформации более верно, чем по другим малым тектоническим формам. Получить правильные абсолютные величины деформаций нельзя, не выясняя одновременно механизм образования единичной складки, что можно представить себе путем решения прямой и обратной задач. При решении прямой задачи выясняется, какой морфологии складка образуется за счет действия заданных сил при определенных механических свойствах слоистой толщи. Обратная задача, т. е. нахождение величины сжатия по морфологии конкретных складок, наблюдаемых в природе, может быть решена при помощи методики, основанной на решении прямой задачи.

Внимание автора привлекли дисгармоничные складки, образованные вязким пластом, окруженным более пластичной средой, в которой эти складки быстро затухают (рис. 1). Прежде чем приступить к решению прямой задачи, необходимо выяснить, какие элементарные механизмы могут участвовать в образовании дисгармоничных складок. Применительно к складкообразованию известны пять элементарных механизмов, которые под разными названиями и с несколько разными трактовками встречаются в литературе: продольное укорочение, изгиб, сплющивание, скальвание и послынное перераспределение.

Продольное укорочение — однородная деформация сжатия — удлинения, при которой силы, действующие вдоль слоя, заставляют его сокращаться в длине и увеличиваться в мощности.

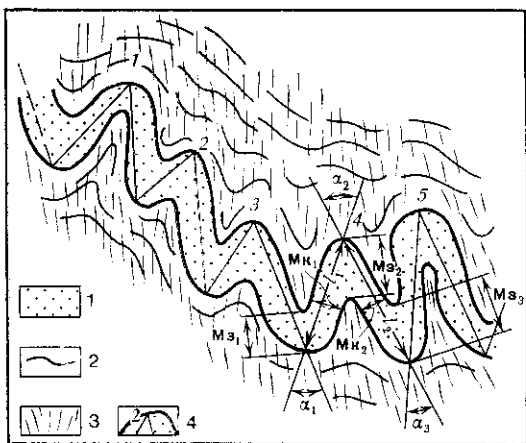


Рис. 1. Серия дисгармоничных складок. Схема замеров параметров антиклинали 4: 1 — песчаник; 2 — слоистость в сланцах; 3 — кляваж в сланцах; 4 — номер складки

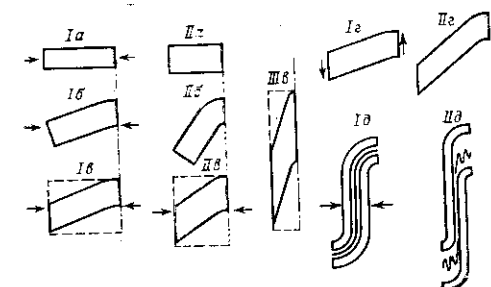


Рис. 2. Элементарные механизмы образования складок: а — продольное укорочение, б — изгиб, в — сплющивание, г — скальвание, д — послойное перераспределение. I—III — стадии процессов

Этот механизм действует только на первой стадии развития складки до момента потери пластом устойчивости (рис. 2, а). На следующей стадии в развитии складки участвуют изгиб, сплющивание и скальвание. Изгиб — однородная деформация, при которой силы действуют перпендикулярно осевой поверхности складки и приводят к сокращению горизонтального проложения слоя за счет увеличения наклона крыла складки. Мощность пласта сохраняется (рис. 2, б). С этим механизмом в литературе связано понятие о параллельных, или концентрических, складках. Сплющивание — однородная деформация сокращения — удлинения, при которой силы сжатия действуют перпендикулярно осевой поверхности складки. При этом увеличивается угол наклона крыла складки, пласт укорачивается при углах наклона $< 45^\circ$ и удлиняется при углах наклона $> 45^\circ$. Мощность пласта в замке складки увеличивается (рис. 2, в). Образующиеся за счет сплющивания складки в литературе именуются подобными. Скальвание — однородная деформация сдвига, при которой действуют пары сил, параллельных осевой поверхности складки. Пласт удлиняется и наклон его увеличивается. Мощность пласта в замке не изменяется. Образующиеся при скальвании складки также подобные, но в отличие от образующихся при сплющивании горизонтальное проложение слоя в них не изменяется (рис. 2, г). Механизм послойного перераспределения может иметь место на последней стадии развития складки, если сминается толща чередующихся жестких и пластичных пород. При крутых углах наклона под воздействием боковых сил сжатия пластичные породы отжимаются с крыльев в замки и сминаются там в мелкие дисгармоничные складки (рис. 2, д).

По мнению автора, образование складок можно представить как одновременное или последовательное действие нескольких или всех

этих механизмов, что в той или иной форме уже высказывали другие исследователи [3, 4, 5].

Рассматриваемые дисгармоничные складки образуют более жесткие пласты среди пластичных сланцев (рис. 1). Очевидно, что при образовании дисгармоничных складок этого типа нет условий для возникновения механизма продольного перераспределения. Оценить действие механизма продольного укорочения исходя только из морфологии складки вряд ли возможно. Поскольку относительно жесткие пласты теряют устойчивость почти сразу после начала деформации, доля механизма продольного укорочения в общей деформации мала, и в построениях автор пренебрегает действием этого механизма. Таким образом, можно представить образование дисгармоничных складок за счет изгиба, сплющивания и скальвания.

Нами деформация оценивалась по изменению горизонтального проложения слоя $\epsilon = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \cdot 100\%$, где l_0 — длина слоя до начала деформации; l_1 — длина горизонтальной проекции слоя, смятого в складки. Величина ϵ здесь и далее называется сжатием. Длину слоя, смятого в складки, измеренную по кровле или по подошве, нельзя принимать за длину слоя до начала деформации, потому что пласты при смятии в складки могут как укорачиваться, так и удлиняться (о чем будет сказано ниже).

О. Стефансон и П. Дж. Хадлстон [5] исследовали развитие складок в единичном изолированном вязком слое за счет сил, направленных параллельно слою, окруженному менее вязкой средой. Конфигурация складок рассчитывалась ими исходя из действия комбинаций изгиба и сплющивания, при условии, что эта комбинация по затратам энергии в каждом случае наиболее выгодна. Исследовались случаи с отношением вязкости пласта к вязкости среды $\eta_1/\eta_2 = 10, 100, 1000$. Приводились рисунки полученных складок. Результаты этих исследований и легли в основу предлагаемой методики.

При разработке методики определения контраста вязкостей и сжатия складок автор данной статьи руководствовался следующими соображениями: методика должна быть основана на минимальном количестве наиболее простых замеров элементов складки, процесс обработки замеров не должен быть громоздким. Исходя из этого любую складку изолированного пласта можно охарактеризовать четырьмя величинами (рис. 3): расстоянием l по направлению от точки пересечения осевой поверхности синклинали и подошвы пласта до точки пересечения осевой поверхности антиклинали и кровли пласта; углом α между этими направлениями; мощностью пласта в замке M_3 как расстояния между кровлей и подошвой пласта по осевой поверхности; мощностью пласта на крыле M_k как кратчайшего реального расстояния между кровлей и подошвой. Если замки складок сильно сближе-

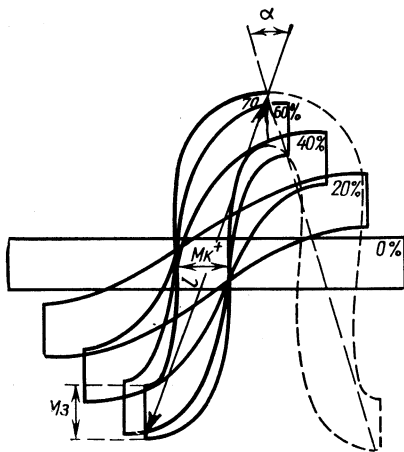
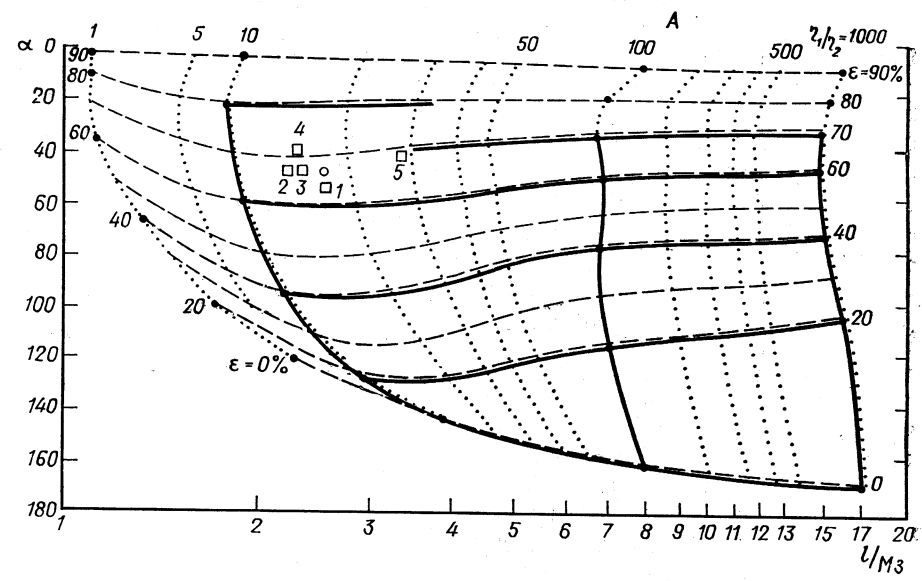


Рис. 3. Модели складок для $\eta_1/\eta_2 = 100$ при различном сжатии (по [5]). Дана схема замеров параметров складок



Б

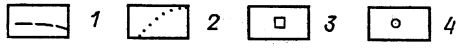
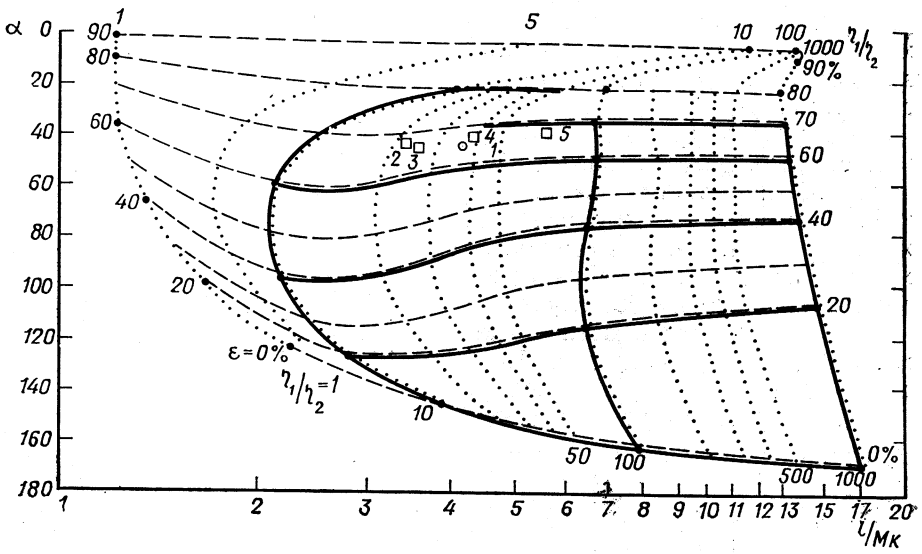


Рис. 4. Развитие дисгармоничных складок (комбинация изгиба и сплющивания):
 А — для отношения l/Mz ; Б — для отношения l/Mk :
 1 — линии одинакового сжатия; 2 — линии одинакового контраста вязкостей;
 3 — точки и номера для складок из серии, изображенной на рис. 1; 4 — точки, получившиеся при осреднении

ны и нельзя было провести перпендикуляр между подошвой и кровлей, за мощность крыла принималось расстояние между подошвой пласта в замке антиклинали и кровлей пласта в замке синклинали. Для получения безразмерных величин расстояние l делилось на M_3 и M_6 . По результатам замеров по рисункам промоделированных Стефансоном и Хадлстоном складок были построены две диаграммы (рис. 4, А, Б, сплошные линии). Область этих линий (для ϵ от 0 до 70—80% и для η_1/η_2 от 10 до 1000) не отражает параметры всех возможных складок, так как существуют складки, сжатие которых более 80% и контраст вязкостей менее 10 (считается, что в природе нет складок с контрастом вязкостей более 1000). Чтобы расширить пределы этих диаграмм, необходимо достроить их для крайнего случая контраста вязкостей $\eta_1/\eta_2 = 1$ и рассмотреть возможное поведение складок при сжатии более 80%.

Контраст вязкостей $\eta_1/\eta_2 = 1$ означает, что слой по своим деформационным свойствам неотличим от среды и составляет вместе с ней однородное тело. Такое тело будет деформироваться без изгиба путем только сплющивания. Поэтому можно графически промоделировать процесс. В прямоугольник вписывалась исходная складка, и горизонтальная сторона последовательно сокращалась с шагом 20% при сохранении общей площади прямоугольника. Отношение длины полуволны исходной складки к мощности пласта бралось как 2 (продолжение прогрессии $\eta_1/\eta_2 = 1000$; $l/M = 16$; $100 - 8$; $10 - 4$; $1 - 2$). Задавался первоначальный угол наклона 3° , как и в экспериментах Стефансона и Хадлстона. После каждого сокращения замерялись те же параметры — l , α , M_3 , M_6 .

При сжатии более 80% крылья дисгармоничных складок будут сближаться и, наконец, сомкнутся. Дальнейшая деформация будет происходить за счет сплющивания. Этот процесс также моделировался графически. По результатам замеров параметров l , α , M_3 , M_6 в графических моделях складок диаграммы были достроены и приняли окончательный вид (рис. 4, А, Б). В этом виде области диаграмм включают параметры всех возможных дисгармоничных складок. Каждая из этих диаграмм отражает развитие дисгармоничных складок за счет двух механизмов — изгиба и сплющивания.

Для того чтобы промоделировать действие скальвания, предположили, что морфология складки будет меняться одинаково как в случае совместного действия скальвания и других механизмов, так и в случае наложения его на уже имеющуюся складку в конце ее развития. Моделирование производилось графически — каждая складка, изображенная на рисунках, подвергалась последовательному сдвигу в вертикальном направлении с изменением угла наклона на $5-15^\circ$ за один шаг. В результате увеличивался угол наклона крыла складки, уменьшалась его мощность. Мощность же в замке складки сохранялась, сохранялось также и горизонтальное проложение пласта. После каждого сдвига замерялись параметры l , α , M_6 и наносились на диаграммы А и Б в виде точек. Величина сдвига и количество операций подбирались так, чтобы последовательность точек образовала линии. Эти линии, названные автором «линиями скальвания», уходили от исходных точек (от параметров складок, в развитии которых не участвовало скальвание) вверх и вправо. На диаграмме Б линии скальвания получились более пологими, чем на диаграмме А, т. е. отношение l/M_6 растет быстрее отношения l/M_3 при развитии процесса скальвания. Чтобы не перегружать диаграммы А и Б, линии скальвания перенесены на диаграмму (рис. 5). На этой диаграмме вертикальные

линии — линии одинакового контраста вязкостей, горизонтальные — линии одинакового сжатия. Линии скальвания переносились на диаграмму по точкам пересечения ими линий одинакового сжатия и линий одинакового контраста вязкостей. При развитии процесса скальвания параметры сжатия и контраста вязкостей складки как бы увеличиваются, причем, как уже отмечалось, отношение $l/M\kappa$ растет быстрее,

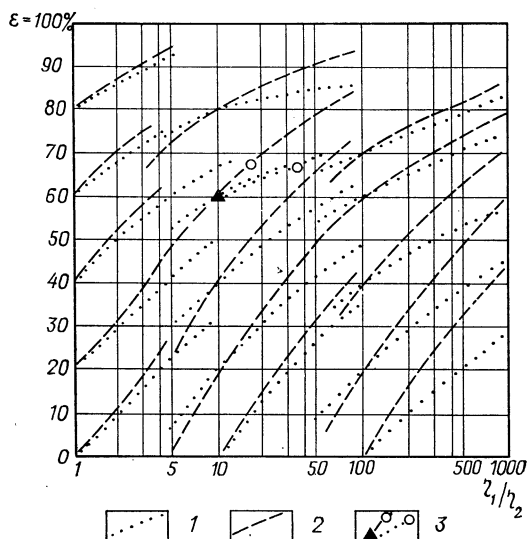


Рис. 5. Развитие дисгармоничных складок за счет механизма скальвания:
1 — линии скальвания для точки с диаграммы Б (отношение $l/M\kappa$); 2 — линии скальвания для точки с диаграммы А (отношение $l/M\lambda$); 3 — операция учета механизма скальвания (пояснения в тексте)

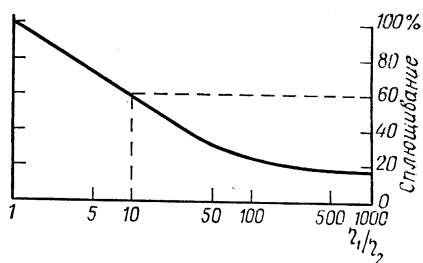


Рис. 6. Зависимость доли механизма сплющивания от контраста вязкостей

чем отношение $l/M\lambda$. Наличие двух линий скальвания, исходящих из одной точки, дает возможность провести обратную операцию. Из двух точек с параметрами ϵ_1 и $(\eta_1/\eta_2)_1$ для первой, нанесенной на рисунке с диаграммы А, и ϵ_2 и $(\eta_1/\eta_2)_2$ для второй, перенесенной с диаграммы Б, которые характеризуют исследуемую складку, проводятся две линии скальвания (рис. 5). Пересечение линий дает точку с истинными параметрами ϵ и η_1/η_2 , которые складка имела до того, как в ее развитии принял участие механизм скальвания, т. е. выявляется результат действия этого механизма. Величина скальвания оценивается по разнице $\epsilon_{1(2)} - \epsilon$, т. е. по величине «мнимого» сжатия за счет скальвания. Доля участия в развитии складки механизма изгиба (и соответственно сплющивания) зависит от контраста вязкостей (рис. 6).

Таким образом, по этим четырем диаграммам можно получать степень сжатия дисгармоничных складок, отношение вязкостей пласта и вмещающих пород и доли участия в развитии складок изгиба, сплющивания и скальвания.

Методика состоит в следующем. Измерялись параметры природных складок по фотографиям или же в обнажении для каждой антиклинали (или синклинали) в серии дисгармоничных складок (рис. 1). Затем значения осреднялись.

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + 2\alpha_2 + \alpha_3}{4}; \quad l = \frac{l_1 + l_2}{2}; \quad M_s = \frac{M_{s_1} + 2M_{s_2} + M_{s_3}}{4};$$

$$M_k = \frac{M_{k_1} + M_{k_2}}{2}.$$

После этого вычислялись отношения l/M_s и l/M_k и на диаграммах А и Б наносились точки по одной для каждой складки в серии (рис. 4, А, Б). Точки осреднялись и на каждой диаграмме получилась одна с параметрами $\epsilon_{1(2)}$ и $(\eta_1/\eta_2)_{1(2)}$. Эти две точки наносились на диаграмму В и по ним учитывалось действие механизма скальвания (рис. 5). Получались истинные параметры сжатия ϵ , контраста вязкостей η_1/η_2 , а также доля участия в образовании складки механизма скальвания $\epsilon_{1(2)} - \epsilon$. По контрасту вязкостей определялись доли участия в образовании складки изгиба и сплющивания, в сумме составляющие 100% (рис. 6). Так, для серии складок (рис. 1) $\epsilon = 60\%$, $\eta_1/\eta_2 = 10$ доли участия в образовании складок механизмов: скальвания $\epsilon_{1(2)} - \epsilon = 5\%$, изгиба — 40 и сплющивания 60%.

Методика была применена для дисгармоничных складок флишевого синклинория южного склона Большого Кавказа в бассейнах рек Риони, Большая Лиахва и Ардон. Складки образованы жесткими пластами песчаника, а также послойными карбонатными жилами. И те и другие переслаиваются с более мягкими мощными пластами глинистых сланцев. Мощность относительно жестких пластов, образующих дисгармоничные складки, изменяется от первых сантиметров до метра, длина крыльев обычно в 2—5 раз больше. Форма складок близка к синусоидальной. Такие складки в этом районе уже описаны [1, 2].

По приведенной методике были обработаны 70 серий складок. Общее количество складок 264, т. е. в среднем по 4—5 складок в серии. Самая крупная серия объединяла 12 складок, 10 серий состояли из одной складки. Серии более или менее равномерно располагались вдоль четырех профилей, пересекающих вкрест простирания выбранную для исследований территорию.

В бассейнах рек Риони, Большая Лиахва и Ардон отложения флишевого синклинория Южного склона Большого Кавказа имеют возраст от верхнеюрского до верхнемелового. Отложения верхнего отдела юрской системы представлены известняками и мергелями с прослоями сланцев и мергелей. Выше залегают черные сланцеватые мергели с редкими прослоями песчаников и глинистые известняки с прослоями сланцев валанжинского яруса нижнего отдела меловой системы. Остальные отложения нижнего отдела меловой системы — это различные чередования сланцев и песчаников. Завершают разрез верхнемеловые карбонатные и терригенные породы, местами пестроцветные. Верхнеюрские и нижнемеловые отложения испытали начальный мегаморфизм (цеолитовая фация). Сланцы и иногда песчаники этого возраста пронизаны кливажем.

Все отложения смяты в складки разных размеров и различной интенсивности — от тесно сжатых до коробчатых. Вкрест простирания

в синклиналии развиты складки второго порядка, называемые далее зонами: северная синклиналиальная зона, центральная антиклинальная зона и южная синклиналиальная зона (рис. 7) [2]. Синклиналии ограни-

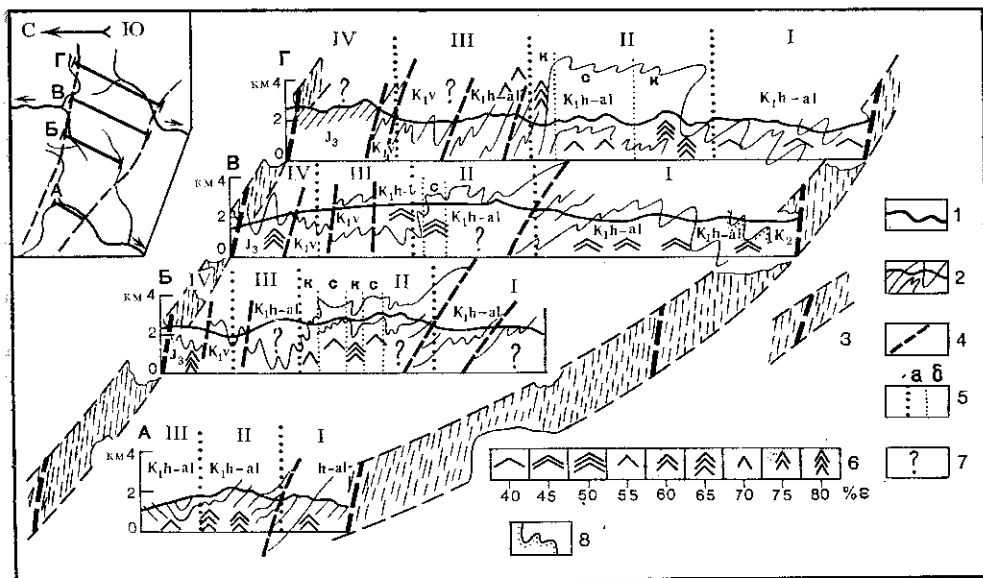


Рис. 7. Блок-диаграмма профилей и схема их расположения: 1 — обобщенная линия рельефа; 2 — линия рельефа и тектоническая структура (схематично), показанная условными пластами; 3 — поверхности сместителей глубинных разломов (северный разлом — Главный Кавказский надвиг); 4 — разрывные нарушения; 5 — номера зон и границы (а — зон, б — подзон; подзоны на профилях: с — свода, к — крыла); 6 — шкала значений сжатия по профилям; 7 — части структур, где дисгармоничные складки не найдены; 8 — стратиграфическая граница разновозрастных отложений. Профиль А по В. Н. Шолпо [2] (с изменениями)

чен с севера и юга крупными разломами, северный из которых носит название Главного Кавказского надвига. С востока на запад на дневную поверхность выходят все более древние отложения, т. е. видны более глубокие части структуры. Нижнюю часть структуры на западе образуют среднесжатые складки, у которых угол схождения крыльев в среднем принимает значения $90-45^\circ$. В верхней части, на востоке, встречаются слабосжатые складки (угол схождения крыльев около 90°) и флексуры, а также сильносжатые складки (угол схождения менее 45°). Следует отметить, что в центральной антиклинальной зоне наблюдается дивергенция осевых поверхностей складок — в северной ее части осевые поверхности (и кливаж) падают на юг под углом до $60-70^\circ$, а в южной части — на север до 45° . В остальных частях района осевые поверхности падают на север от 90 до 50° , причем более крутые падения встречаются в глубоких частях структуры.

При обработке 70 серий дисгармоничных складок получены следующие результаты. Сжатие дисгармоничных складок по всему району меняется от 25 до 80%, контраст вязкости для песчаников по отношению к сланцам принимает значения от 2 до 40, в среднем около 10, для карбонатных жил по отношению к сланцам — от 20 до 50. Доля механизма скалывания менялась от 0 до 30%. Выяснилось наличие хорошей связи сжатия со структурой района. Серии объединя-

лись по зонам и подзонам, в среднем по 4 серии в зоне (подзоне), самое большое — 10 серий, объединяющих 39 складок (рис. 7, зона I, профиль В), самое меньшее — 2 серии по 2—3 складки (зона I, Г и IV, Б) и в одном случае — 1 серия из 8 складок (подзона с, В). В некоторых зонах по разным пересечениям дисгармоничные складки не обнаружены (рис. 7). В целом по району в центральной антиклинальной зоне (рис. 7, зона II) сжатие больше, чем в соседних синклинальных зонах (зоны I и III). Складки северной синклинальной зоны в северной части (зона IV) имеют также большое сжатие (ϵ равно 67 и 75%), по-видимому, за счет давления со стороны блока, поднятого по Главному Кавказскому надвигу. В зоне I сжатие меняется от 59 до 40% с запада на восток от нижней к верхней части структуры. В зоне III (северная синклинальная зона), кроме района профиля Г, сжатие уменьшается с запада на восток — с 57 до 49%. В центральной антиклинальной зоне по профилю А наиболее глубинная часть структуры не расчленена на какие-либо подзоны, здесь сжатие 64%. Двигаясь к востоку (профиль Б), мы попадаем в более верхнюю часть структуры, где зона состоит из трех коробчатых складок. На крыльях складок (подзона к) сжатие 60—65%, в сводах (подзона с) 55—57%. На профиле В в своде коробчатой складки сжатие 50%. По профилю Г на месте трех коробчатых складок — одна большая коробчатая антиклиналь, свод которой образуют флексуры, спускающиеся к югу. Здесь сохраняется та же закономерность: сильносжатые складки на крыльях ($\epsilon=61$ и 79%) и слабосжатый свод ($\epsilon=55\%$). Из-за сложности структуры не ясно положение самых северных точек на профиле Г — относятся ли они к северному крылу коробчатой антиклинали или же это складки северной синклинальной зоны. Здесь сжатие 70%. Следует отметить, что коэффициент вариации при осреднении значений сжатия для серий складок в одной зоне не превышал 26%, а в среднем равнялся 13%, что говорит о хорошей надежности методики.

Для сравнения 45 серий складок были обработаны по коэффициенту избыточной длины слоя: измерялась длина слоя, смятого в складки l_0 , и длина его проекции на линию, перпендикулярную осевым поверхностям дисгармоничных складок l_1 , а затем находилось сжатие по формуле $\epsilon' = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \cdot 100\%$. Принимая значение сжатия,

полученное с помощью методики, основанной на механизме образования единичной складки, как истинное, находилось отклонение

$$\delta = \frac{\epsilon' - \epsilon}{\epsilon} \cdot 100\% \quad \text{для каждой серии. Выяснилось, что отклонения}$$

для значений сжатия, полученных по коэффициенту избыточной длины слоя, находятся в пределах от +16 до -90% и в среднем $\delta = -35\%$. Это говорит о том, что пласты в процессе образования дисгармоничных складок часто испытывали укорочение. Укорочение сильнее проявлено для складок с меньшим сжатием. Так, для сжатия $\epsilon=50\%$ отклонения ($-\delta$) больше, чем для $\epsilon=70\%$, при одних и тех же условиях. Укорочение также сильнее для серий складок с меньшим контрастом вязкостей, т. е. для $\eta_1/\eta_2=5$ отклонения при одних и тех же условиях больше, чем для $\eta_1/\eta_2=15$. Механизм скалывания увеличивает длину слоя и уменьшает отклонения. Большой долей участия в образовании складок механизма скалывания (до 10—15%) объясняются случаи относительного удлинения слоя (когда δ принимает положительное значение). Верно оценивать сжатие дисгармонич-

ных складок можно только при помощи методики, учитывающей механизм образования единичной складки.

Таким образом, сжатие складок в центральной антиклинальной зоне сильнее, чем в соседних синклиналих. Сжатие складок в синклиналих зонах уменьшается с переходом в верхние части структуры. В антиклинальной зоне с переходом на более верхние уровни структуры появляются сначала отдельные коробчатые складки, которые еще выше объединяются в одну крупную коробчатую антиклиналь. При этом в сводах коробчатых складок сжатие слабое, а на крыльях наиболее сильное.

Еще раз необходимо отметить, что в статье предлагается методика получения абсолютных величин деформации по дисгармоничным складкам, основанная на решении вопроса о механизме образования единичной складки. Полученные величины сжатия еще не говорят о природе образования всей складчатой структуры данного района.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллова И. В. К вопросу об условиях образования мелких дисгармоничных складок во флишевой зоне (на примере южного склона Большого Кавказа). — «Геотектоника», 1968, № 2.
 2. Очерки структурной геологии сложнослоистых толщ. Под ред. В. В. Белоусова и В. В. Эза. М., 1977.
 3. Паталаха Е. И., Смирнов А. В., Поляков А. И. Генетические типы геосинклинали складчатости (Казахстан). Алма-Ата, 1974.
 4. Хиллс Э. Ш. Элементы структурной геологии. М., 1954.
 5. Hudleston P. J., Stephansson O. Layer shortening and foldshape development in the buckling of single layers. — «Tectonophysics», 1973, vol. 17.
-