

УДК 551.24.035

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ КАК ОДНО ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ТЕКТОНОФИЗИКИ

Ф.Л. Яковлев

Обсуждаются основные методологические вопросы выявления механизмов образования линейной складчатости. Показано, что последовательное развитие принципов, заложенных М.В.Гзовским (специальные экспериментальные и полевые исследования, корректное сопоставление природных и модельных структур и т. д.), позволяет наметить пути разрешения проблемы механизма образования линейной складчатости. Линейная складчатость представляет собой иерархическое явление, на каждом уровне которой от внутрислойных объектов до складчатых поясов действуют свои совокупности простых механизмов. Сочетания механизмов на каждом уровне образуют кинематические (геометрические) модели типичных структур. Кратко охарактеризованы принципы основных методик определения параметров количественных кинематических моделей структур различного уровня. Для складок единичного вязкого слоя и пачек слоев определяются вклады механизмов изгиба и сплющивания и размер сокращения складок. Для тектонических зон и их крупных частей на основе измерения ряда геометрических параметров в качественном виде выявляются основные, дополнительные и локальные механизмы образования. Затем определяются величины основных механизмов — поперечного сокращения всей структуры и (при наличии) величина адвекции.

Проблема механизма складкообразования является одной из самых трудных в геотектонике [1, 12]. В свое время значительный вклад в ее решение был внесен М.В. Гзовским. Дополнительно к имевшимся на конец 50-х годов структурно-геологическим методам им был создан комплекс полевых и лабораторных методов для изучения тектонических полей напряжений, применение которых в Байджансайском антиклинории позволило не только надежно исследовать историю формирования всех структур, но и выявить механизмы их деформирования, что в свою очередь позволило дать прогноз для поисков рудопроявлений (позднее блестяще подтвердившийся) [3, 5]. Поэтому можно считать, что М.В. Гзовский, сумев создать аппарат описания механизмов деформирования для областей промежуточной складчатости (слаборазвитой линейной), практически разрешил проблему формирования этого класса структур. Однако за пределами этих работ остались структуры интенсивно деформированной линейной складчатости флишоидных толщ с сильно развитым кливажем.

Основные принципы кинематического подхода к решению проблемы образования линейной складчатости

В настоящее время в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН развивается подход к решению проблемы образования линейной складчатости, который может быть назван кинематическим и который в целом восходит к принципам, разработанным М.В. Гзовским, хотя и имеет существенные особенности.

Наиболее важное отличие — то, что линейная складчатость считается иерархическим явлением, в котором может быть выделено не менее семи уровней структур [16, 17]. Эти уровни включают в себя:

внутрислойные деформации, отдельные складки, складчатые домены, структурные ячейки, тектонические зоны, мегантиклинории (Большой Кавказ), складчатые пояса (Альпийский). В типичных структурах на каждом уровне проявляются свои простые механизмы и их комбинации, которые должны изучаться каждый раз специфическими методами. Так, при изучении малых объектов типа оолитов (внутрислойные деформации, уровень I) методами стрейн-анализа совершенно справедливо большое значение придается процессам растворения зерен кварца и кальцита под давлением и переотложения этого материала в соседних участках структуры (например, [2]). Модели, описывающие такие деформации, должны, безусловно, учитывать это явление. Но уже на уровне доменов (совокупностей ряда складок) явление растворения и переотложения материала может не учитываться, если известно, что валовый состав толщи в этих объемах существенно не меняется, т. е. если материал в процессе растворения и переотложения не покидает рамки этой структуры. Иначе говоря, наличие семи иерархических уровней линейной складчатости заставляет иметь вместо одной серии классификаций ([4]: морфологическая; физико-генетическая, она же систематика механизмов, и геолого-генетическая) семь серий таких классификаций.

При создании моделей линейной складчатости нами принимается неизменность объема деформируемых тел (или плотности горных пород), а также отсутствие перемещения вещества (удлинения или укорочения структуры) вдоль шарниров, что является одним из основных признаков, отличающих линейную складчатость от прерывистой и метаморфической. Для исследования структур каждого уровня ищутся такие комбинации замеров их геометрии, которые могут быть легко найдены как в моделях, так и в природных объектах. Тем самым обеспечивается

принципиальная возможность решения обратной задачи — дать характеристику природного объекта, отталкиваясь от какой-либо его модели. Система замеров должна позволять фиксировать любые изменения формы изучаемых объектов. Как правило, для этого используются не привычные для всех эллипсоиды деформации, а параллелограммы (деформированные исходные квадраты) или треугольники. Нормальной последовательностью этапов считается сначала исследование геометрии и качественный выбор возможной модели из имеющихся изученных (обычно это комбинации простых моделей-механизмов), а уже затем — численная характеристика деформации структуры с использованием выбранной модели. Здесь важно обратить внимание на то, что используемые комбинации простых механизмов не являются механизмами физическими (это не динамическое описание системы сил и перемещений в рамках сложной реологической слоистой модели). Это скорее система координат, которая позволяет адекватно описать только кинематику движений, подобно тому, как в физике свободный полет тела легко описывается как комбинация его горизонтального поступательного перемещения и вертикального перемещения в поле силы тяжести. В перспективе переход к изучению динамики природных складчатых структур (т.е. к анализу истории напряженного состояния, связей вязкостных свойств деформируемой среды, времени и величины деформаций) возможен только после надежного описания кинематики этих структур.

Количественный анализ кинематики образования отдельных складок, имеющих надежно выявленные возможные комбинации простых механизмов

Самым простым примером применения подобных принципов может быть исследование складок единичного вязкого слоя (уровень II). Складки такого рода образованы либо слоями песчаника (рис. 1, А), окруженными менее вязкой средой, обычно сланцами, либо жильными породами (пегматитовые складки). Характер объекта таков, что механические аспекты его формирования достаточно просты, и прямая задача по моделированию этих складок с помощью методов конечных элементов уже давно была реализована рядом исследователей [7, 18, 21, 23]. Геометрия использованной нами модели [22]

(рис. 1, Б) рассчитывалась исходя из энергетически наиболее выгодного на каждый момент сочетания двух возможных механизмов — изгиба и сплющивания (однородного сокращения). Идея решения обратной задачи заключается в применении к модели и к исследуемому объекту одной и той же системы замеров геометрии структуры [13]. В данном случае это линии, соединяющие кровлю слоя в антиклинали с его подошвой в синклинали, мощности слоя в замке и на крыле, а также угол между крыльями складки, измеряемый как угол между соседними линиями. В публикации П. Хадлстона и О. Стефансона [22] давались три варианта модели (соотношение вязкостей слоя и среды — 10, 100 и 1000) с сокращениями от 1 (отсутствие) до 3,3—5 раз (70—80% или 0,3—0,2). По замерам геометрии модели были построены диаграммы (угол — отношение длины крыла к мощности замка или крыла), которые в дальнейшем были интерполированы, а также экстраполированы до соотношения вязкостей 1,0. Данная диаграмма позволяет определять размер сокращения складок единичного вязкого слоя в направлении, перпендикулярном биссектрисе угла схождения крыльев, а также величину отношения вязкостей слоя и среды в предположении, что действующие механизмы ограничены сочетанием изгиба и сплющивания (рис. 1, В). Сама методика является более сложной, чем здесь показано; она включает подобную диаграмму для угла и отношения длины крыла к его мощности, а также диаграмму для учета возможного действия механизма осевого сдвига (термин А.Г. Малюжинца), или скалывания. Для нас же здесь важно показать сам подход и его эффективность.

Для проверки того, насколько точно могут быть определены параметры складок единичного вязкого слоя, нами были использованы четыре стадии модели, в которой складки образуются в результате перемещения бокового штампа [19]. Средняя часть толщи является более вязкой, чем верхняя и нижняя, и образует крупные складки, в первом приближении являющиеся складками единичного вязкого слоя (рис. 1, Г). Размер сокращения для каждой стадии может быть легко вычислен по известному размеру квадратной метки и исходной мощности слоя и сопоставлен с получаемым по методике. Полученный результат (табл. 1) на первый взгляд не вполне удов-

Таблица 1

Сопоставление результатов замеров сокращения по модели изгиба единичного вязкого слоя (указаны сокращение и контраст вязкости) и по увеличению мощности всего слоя

	Стадии эксперимента			
	F-14-III	F-14-IV	F-14-V	F-14-VI
Сокращение модели L_0/L_1 ; по замерам мощности всего слоя	1,25	1,38	1,46	1,61
Сокращение модели по диаграмме А; контраст вязкости (к.в.)	1,27 к.в.=2	1,58 к.в.=7,5	1,72 к.в.=1,65	2,11 к.в.=10,5
Сокращение модели по диаграмме Б;	1,33 к.в.=3,5	1,6 к.в.=5,0	1,82 к.в.=1,9	2,04 к.в.=7,5
Сокращение модели по диаграмме В;	нет реш.	1,75 к.в.=8,0	1,59 к.в.=4	2,22 к.в.=12
Размер осевого сдвига	нет реш.	до -0,15	0,23	до -0,18

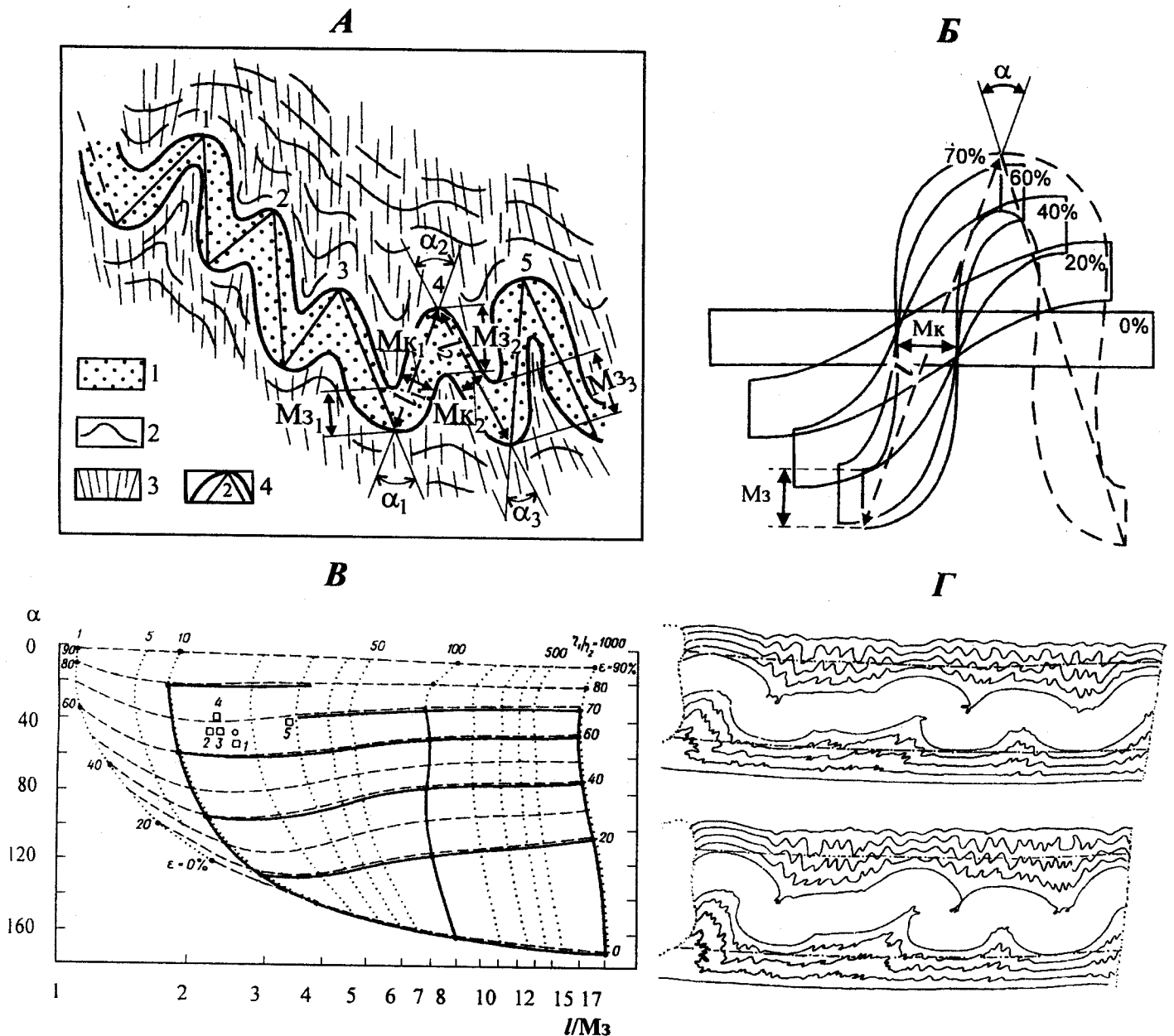


Рис. 1. А — складки единичного вязкого слоя в песчаниках (1), окруженных сланцами (2) с развитыми трещинами кливажа (3). Показана система замеров геометрии складок. Б — складки единичного вязкого слоя, построенные по методу конечно-элементного моделирования [22]. Соотношение вязкостей равно 100. В — номограмма для определения размера сокращения и соотношения вязкостей в складках единичного вязкого слоя [13]. Г — стадии 3 и 4 моделей складок единичного вязкого слоя [19]

летворителен. Однако надо учитывать, что мощность соседних с вязким слоем толщ была явно недостаточна для свободного развития складок, это приводило к развитию надвигов (что и было основной целью экспериментов). Такое свойство модели приводило к относительному уменьшению длины крыльев, увеличению их мощности и увеличению угла между крыльями. Соответственно в методике это приводило к заметным отклонениям на диаграммах положений точек от тех, которые должны были бы быть, что фиксируется отрицательными величинами осевого сдвига (2 и 4 стадии), а также заметно большими величинами контраста вязкостей (истинный лежит, видимо, в пределах 2—3). Поэтому только первая и третья стадии эксперимента были интерпретированы с минимальными ошибками. Вероятно

также общая ошибка из-за возможного избыточного (по сравнению с теоретической моделью, лежащей в основе методики) роста мощности слоя на доизгибном этапе развития эксперимента. Если принимать эти объяснения, то в целом результат можно считать вполне удовлетворительным. Описываемая методика была применена для нескольких десятков складок в Чиатурской зоне Большого Кавказа. Размер сокращения складок менялся от 1,33 до 5,0 раз (25—80% или 0,75—0,2), что позволило надежно выделить несколько частей структуры по этому параметру [13].

На базе представлений о формировании складок пачек слоев как комбинации этих же трех механизмов (изгиб, сплющивание, осевой сдвиг) была создана методика определения размера горизонтального сокращения по морфологии компетентно-

го слоя [14]. По результатам исследований складок того и другого типа в Чаурской зоне удалось сопоставить результаты двух методик для тех семи участков, где они наблюдались практически совместно. Как видно из табл. 2, средние значения выборки почти совпадают, а коэффициент корреляции очень высокий. Это говорит о практически совпадающих результатах обоих методик.

Таблица 2
Значения сокращения $((L_0 - L_1)/L_0) \times 100\%$

53	40	65	51	41	45	64	средн.	52,13	коррел.	=0,935
55	45	62	48	48	50	64	средн.	54,25		

Качественное исследование морфологии крупных природных структур с целью выявления наиболее адекватной им кинематической модели

В случае исследования более крупных структур едва ли не главной проблемой является выявление того, какие именно механизмы могли образовать данную структуру. Покажем возможности качественного выбора модели образования складчатости на уровне тектонических зон (IV—V уровни иерархии структур) на основании изучения геометрии складчатых доменов (III уровень) [16].

Для исследования тектонических зон (V уровень) необходимо несколько детальных пересечений, в каждом из которых выделяются тектонические ячейки (IV уровень) как части структур от ядра локального антиклинория до ядра локального синклинория (рис. 2, А). В каждой ячейке выделяется не менее трех складчатых доменов как совокупностей складок примерно одного облика (по сжатости складок и по наклону осевых поверхностей). В каждом домене измеряются (рис. 2, Б) наклон осевых поверхностей складок Ax , наклон зеркала складок En , размер сокращения складок Sh [16].

Выбор качественной модели осуществляется на основе изучения тенденций развития количественной характеристики геометрии ряда моделей (эквивалентных и расчетных). Были исследованы складчатости гравитационная, бокового давления, структуры сокращения основания осадочного слоя, адвективные модели и модель типа "адвекция с наложенным поперечным сокращением" [16]. Так, на четырех эта-

пах модели бокового давления Дж. Диксона и Р. Тиррела, уже упомянутой выше (рис. 3, А), были выбраны две линии профиля (в верхней и нижней частях всех моделей), которые были разбиты на 26 доменов каждая. Результаты замеров геометрии этих доменов были вынесены на три диаграммы рассеяния типа "X—Y" (рис. 3, Б). Наклоны осевых поверхностей складок (Ax) откладывались на диаграммах I и III по вертикальной оси; размер сокращения (Sh) откладывался на диаграммах I и II по горизонтальной оси; наклон зеркала складок (En) откладывался по вертикальной оси диаграммы II и по горизонтальной оси диаграммы III. Точки замеров образовали достаточно компактные ареалы, показанные раздельно для каждого профиля и каждой стадии. На диаграммах существуют точки, в которых складчатость отсутствует ($90^\circ Ax$, $0^\circ En$, $1,0 Sh$). Именно из "окрестностей" этих точек выдвигаются ареалы, и чем больше "интенсивность" складчатости, тем дальше от этого участка уходит положение наиболее развитых доменов. Верхний профиль (четыре стадии по 26 измеренным доменам, приведены контуры ареалов только для 1-й и 4-й) показывает свойства складчатости *горизонтального укорочения (сокращения)*, т. е. ориентировки Ax и En меняются слабо при увеличении размера сокращения складок. Толща, в которой проведен нижний профиль, испытывает прилипание, и здесь регистрируется механизм *горизонтального сдвига (перекашивания)*, т. е. зеркало остается субгоризонтальным, увеличиваются размер сокращения и наклон осевых поверхностей складок (четыре стадии, показаны только А и Г). Около штампа домены нижнего профиля показывают свойства локального механизма *изгиба (поворота)*, при котором толща вращается с сохранением угла между осевыми поверхностями и зеркалом, близкого к прямому. Направления развития этих механизмов показаны на диаграммах стрелками (рис. 3, Б).

Столь же подробно были изучены и остальные эксперименты. В эксперименте бокового давления В.Г. Гутермана [8] рядом с локальными надвигами небольшой амплитуды были найдены домены, у которых увеличение сокращения складок сопровождается увеличением угла между осевыми поверхностями и зеркалом складок до близкого к $160-180^\circ$. Этот локальный механизм может быть назван *принадвиго-*

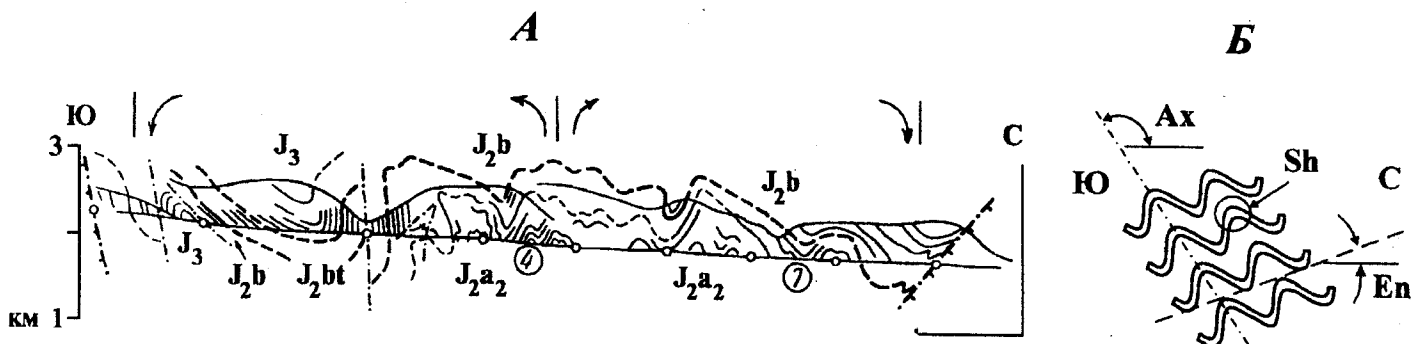
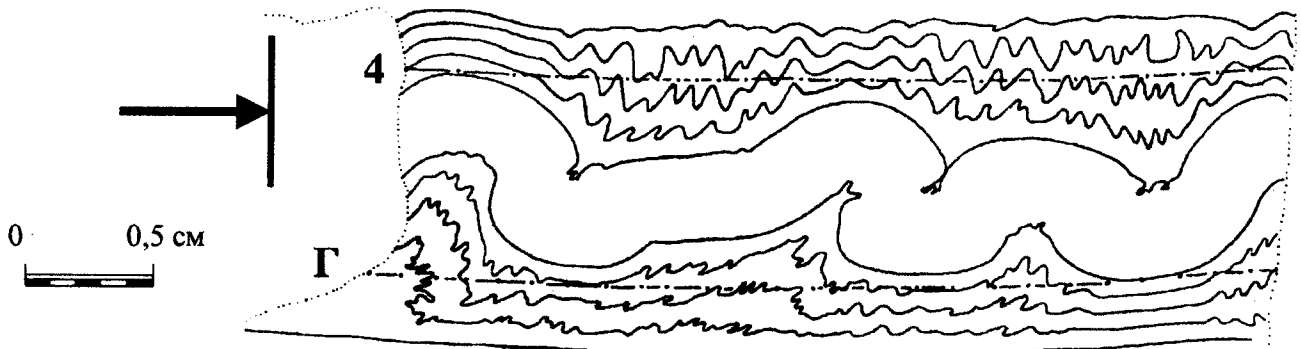


Рис. 2. А — структурный разрез через Тфанскую зону Большого Кавказа. Показаны две структурные ячейки (стрелки) и границы восьми доменов. Б — замеры геометрии домена

А



Б

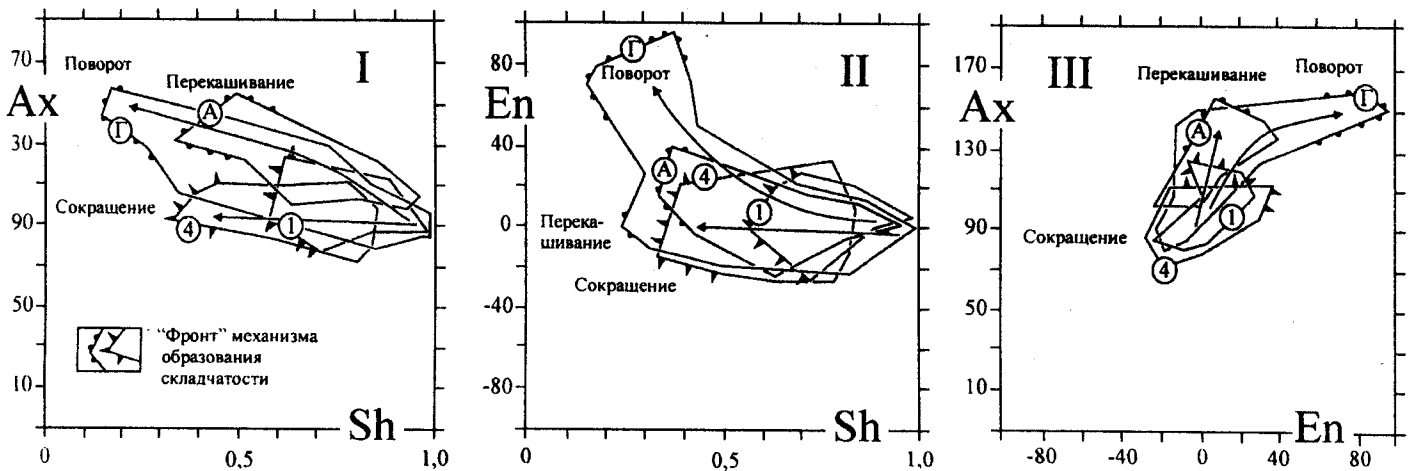


Рис. 3. А — модель бокового давления [19], рисунок по фотографии. Б — диаграммы (I, II, III) рассеяния для анализа конфигурации ареалов замеров геометрии доменов

вым или *дуплексоподобным*. Было показано также, что *адвективные* модели [6] имеют значительные изменения наклонов зеркала складок и осевых поверхностей при относительно слабом их сокращении. Модель комбинированная (адвекция с наложенным горизонтальным укорочением) может быть наиболее близка к природным структурам. Эти модели были сведены на тех же трех диаграммах (рис. 4). Как и на предыдущих диаграммах, здесь для механизма адвекции показаны контуры конкретной модели (А) и стрелками показаны тенденции изменения геометрии доменов при развитии процесса. Модель синтетическая (*адвекция плюс сокращение*) показана в виде контура совокупности нескольких моделей (С), подобранных для изученных структур Большого Кавказа. Модель локального механизма образования *принадвиговой* (П) складчатости показана как тенденция. Остальные изученные механизмы на данных диаграммах не показаны, чтобы не усложнять рисунок.

Предлагаемый подход опробован на материале 12 пересечений через три тектонические зоны Большого Кавказа (рис. 5); с юга на север — Чианурская, Тфанская и Шахдагская. Общее количество измеренных доменов составило 151 (39, 76 и 36 соответственно). Вынесенные на диаграммы точки окон-

турены отдельно для каждой зоны — (Ч), (Т) и (Ш). На диаграммах I и II хорошо видно, что в среднем интенсивность складчатости усиливается с севера на юг, причем максимально развитые домены в каждой зоне занимают на диаграммах примерно одинаковое положение. На этих же диаграммах горизонтальной штриховкой нанесено положение синтетической модели, а также локального механизма образования *принадвиговой* (дуплексоподобной) складчатости северной (вертикальная штриховка) и южной (прерывистая вертикальная штриховка) вергенции.

Как видно из диаграмм, комбинация регионально развитой адвекции с наложенным сокращением, а также локально развитая *принадвиговая* складчатость в первом приближении объясняют особенности геометрии трех зон Большого Кавказа. Было отмечено, что домены с локально развитым механизмом *принадвиговой* складчатости в структуре зон занимают, как правило, либо позицию рядом с крупными разрывами на границах зон, либо позицию рядом с крупнейшими разрывами внутри зон. При этом южная (Чианурская) зона имеет южную вергенцию, северная (Шахдагская) — северную вергенцию. Таким образом, структура Большого Кавказа может считаться в целом *дивергентной* для исследованных зон.

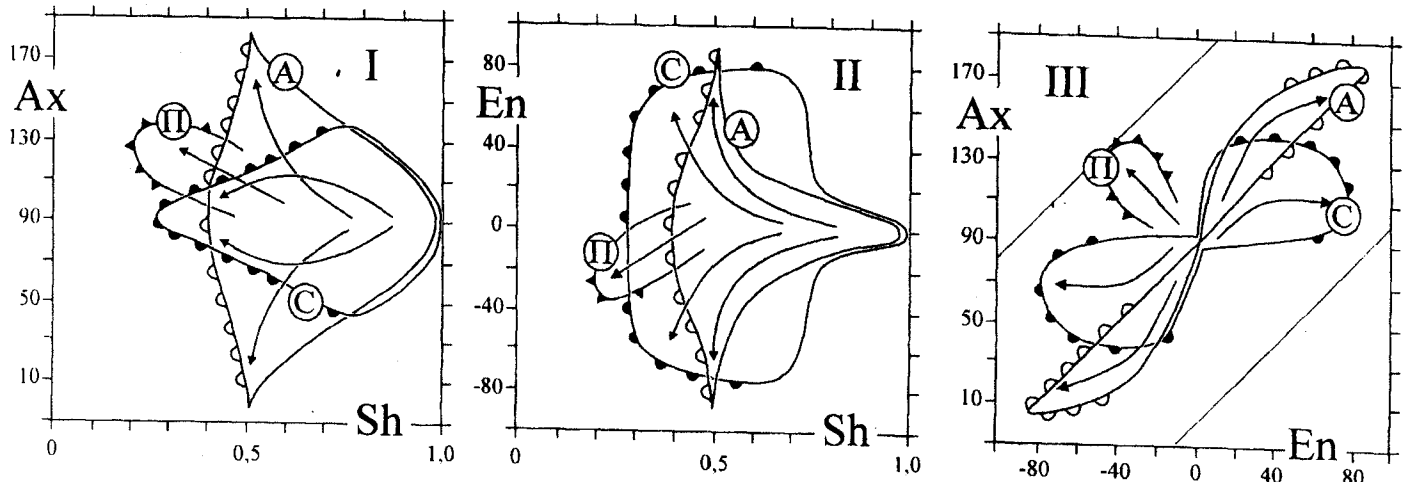


Рис. 4. Диаграммы рассеяния для моделей адвективной, синтетической и приадвиговой

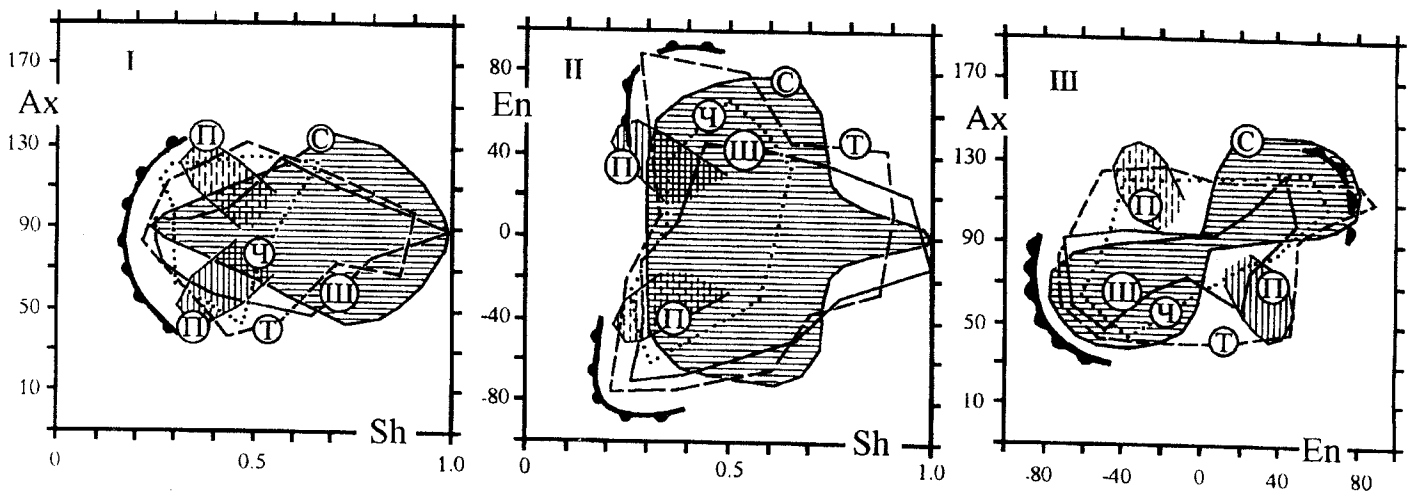


Рис. 5. Диаграммы рассеяния (I, II и III) для структур Большого Кавказа

Количественное исследование механизма образования природных структур по кинематической модели

В заключение, уже без подробного рассмотрения, упомянем метод, позволяющий оценивать размер сокращения структур типа тектонических зон, а также (для зон, где на качественном уровне выявлена комбинация механизмов адвекции и горизонтального сокращения) амплитуды адвекции [15]. Метод состоит из двух частей. В первой исследуемая структура разбивается на относительно однородные домены, в которых кроме уже упомянутых ранее трех структурных признаков измеряются два параметра — длина профиля вдоль линии профиля и наклон этой линии профиля. Далее каждый домен проходит процедуру восстановления доскладчатого состояния путем изменения численных параметров механизмами поворота, горизонтального сдвига и удлинения. При этом длина и наклон линии профиля приобретают доскладчатое положение (рис. 6, А). Подставляя домены друг к другу (при условии отсутствия разрывов), получаем доскладчатое положение всей линии профиля (рис. 6, Б). Отношение величины горизонтального проложения исследуемого профиля к его доскладчатому

той длине дает размер внешнего сокращения всей структуры. Вторая часть метода основана на сравнении исследуемой структуры с кинематической моделью типа “адвекция плюс сокращение” (рис. 7). Эта модель была использована как общий механизм, обеспечивающий возможность возникновения мелких складок и общий поворот всей толщи. Было выяснено, что для такой модели характерно среднее сокращение складок по профилю (подсчитанное по специальной формуле), которое превышает внешнее сокращение всей структуры, причем превышение связано с величиной (амплитудой) адвекции. Для ее определения была построена номограмма (рис. 7). Эта работа была выполнена раньше (1987 г.), чем показанный в предыдущей части качественный анализ возможных механизмов образования линейной складчатости по морфологии доменов (1997 г.). Поэтому можно считать, что обоснование применимости метода определения амплитуды адвекции к конкретным структурам было получено позже. Одновременно, правда, возникла необходимость внесения в эту методику поправки на действие механизма приадвиговой складчатости.

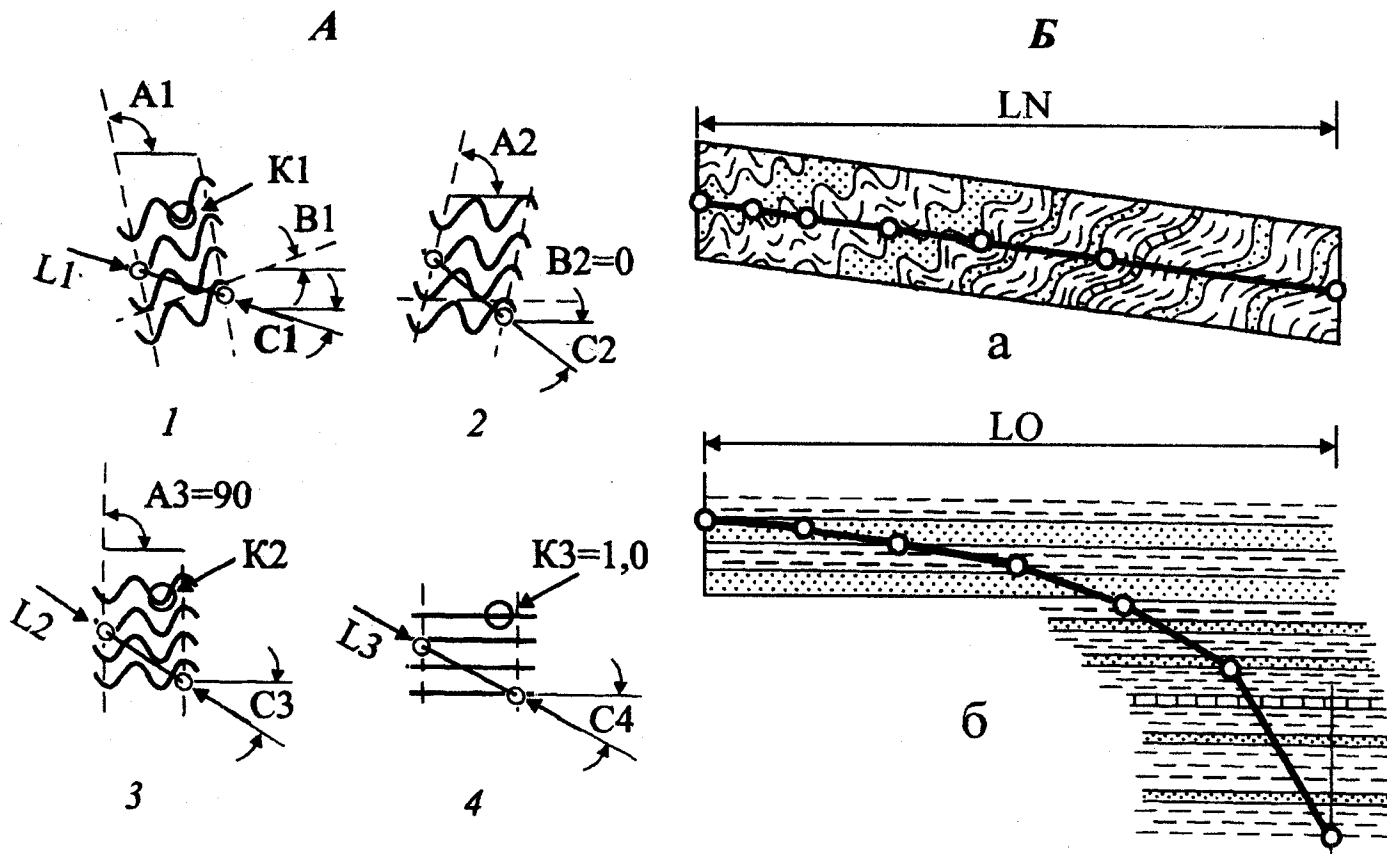


Рис. 6. А — кинематические операции восстановления доскладчатого положения доменов: наклона (1—2), сдвига (2—3), удлинения (3—4). Б — восстановление доскладчатого положения профиля (б) на примере теоретической (чисто адвективная) структуры (а)

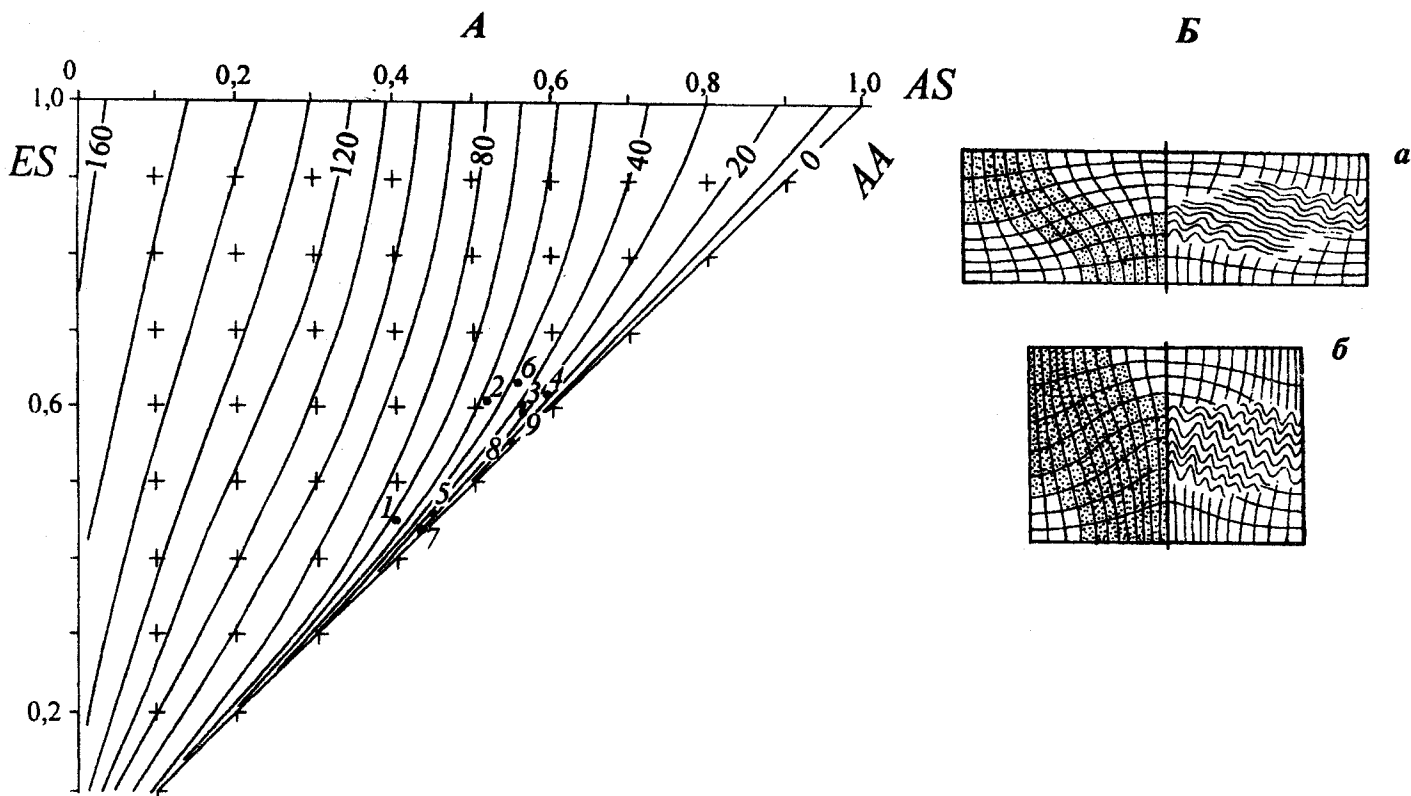


Рис. 7. А — номограмма для определения амплитуды адвекции. Б — модель "адвекция плюс сокращение" (а — чистая адвекция, б — то же укорочено в 1,5 раза)

Обсуждение

Если считать, что представленный материал показывает один из перспективных путей решения проблемы образования линейной складчатости, то имеет смысл посмотреть, какие особенности предлагаемого подхода обеспечили относительное продвижение. Наиболее просто решаемые задачи (до сих пор активно обсуждаемые в западной прессе) касаются тех структур, морфология и механизм образования которых совершенно понятны. Это складки единичного вязкого слоя и структуры-индикаторы внутрислойных деформаций (предмет стрейн-анализа [24]). По этим направлениям существуют численно решенные прямые задачи и ряд методов решения задач обратных, в том числе может быть получен размер сокращения структуры. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что эти структуры как особенно входящие в традиционные морфологические классификации известны несколько десятилетий. В то же время попытки поставить задачу численного моделирования более сложных структур (антиклинориев, тектонических зон) наталкиваются на невозможность дать формализованное описание механизмов, участвующих в их образовании (например, при создании балансированных пересечений [10, 20]). Поэтому решения для крупных структур в целом носят качественный характер, без численной характеристики действовавших процессов. Формализованные приемы описания морфологии (методы Е.И. Паталахи [9] и Е.А. Рогожина [11]) по тем или иным причинам не приспособлены выявлять реально действовавшие механизмы в природных структурах. С этой точки зрения предлагаемая нами иерархическая систематика является ключевым моментом всего

подхода. Для каждого иерархического уровня можно выявить несколько морфологических типов структур с определенным набором формализованных (численно описываемых) механизмов для каждого такого типа. После этого, применяя уже известные приемы исследования, несложно проанализировать на качественном уровне, какая именно модель (в смысле сочетания определенных механизмов) применима к конкретным структурам, и получить соответствующее этой модели количественное описание деформационной картины. Повторимся еще раз: все это касается только самых основ кинематической картины деформаций; собственно динамическая задача в рамках предлагаемого подхода пока не решается.

Таким образом, последовательное развитие принципов, заложенных еще М.В. Гзовским, а именно — опора на теоретическую механику, на корректно поставленные эксперименты на эквивалентных материалах, определенные формализованные процедуры сопоставления полученных теоретических данных со специально изученными природными структурами — позволяет, наконец, на хорошем численном уровне подойти к решению проблемы складкообразования. Это, конечно, не означает скорого решения всей проблемы, поскольку изученная нами кинематическая ее сторона только начинает получать адекватное освещение. Заметим, что основное продвижение обеспечивает именно “выявление существующих типов механизма формирования складок и детальное... изучение и описание каждого типа” [4, с. 294]. В этой цитате пропущено слово *физическое*. Данный пропуск как бы намечает направление дальнейшего развития этих методов и переход к динамическому описанию механизмов формирования складчатых структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В.В. Проблема происхождения складчатости (вступительные замечания) // Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М., 1962. С. 3—8.
2. Галкин В.А. Роль флюидов в формировании деформационных структурных парагенезов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол. 1993. № 5. С. 59—70.
3. Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. 1 и 2. М., 1959. 265 с.
4. Гзовский М.В. Новое направление изучения складок // Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М., 1962. С. 289—305.
5. Гзовский М.В., Ма-Цзинь. Зависимость строения складок поперечного изгиба от скорости и истории их роста // Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М., 1962. С. 306—324.
6. Гончаров М.А. Механизм геосинклинального складкообразования. М., 1988. 264 с.
7. Григорьев А.С., Ионкин В.П. Решение задач тектонофизики методами механики твердого деформируемого тела (обзор) // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1972. № 1. С. 3—34.
8. Гутерман В.Г. Механизмы тектогенеза (по результатам тектонофизического моделирования). Киев, 1987. 177
9. Паталаха Е.И. Тектонофациальный анализ складчатых сооружений фанерозоя. М., 1985. 169 с.
10. Прокопьев А.В. Кинематика мезозойской складчатости западной части Южного Верхоянья. Якутск, 1989. 128 с.
11. Рогожин Е.А. Морфологическая неоднородность полной складчатости как показатель механизма складкообразования // Строение и эволюция тектоносферы. М., 1987. С. 107—133.
12. Хаин В.Е. О главных факторах складкообразования (в связи со статьей Ф.Л. Яковлева “Исследование кинематики линейной складчатости (на примере Юго-Восточного Кавказа)”) // Геотектоника. 1987. № 4. С. 122—124.
13. Яковлев Ф.Л. Оценка деформаций в складчатой области по дисгармоничным складкам // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1978. Т. 53, вып. 5. С. 43—52.
14. Яковлев Ф.Л. Две методики определения размера горизонтального сокращения по морфологии складок // Математические методы анализа геологических явлений. М., 1981. С. 70—76.
15. Яковлев Ф.Л. Исследование кинематики линейной складчатости (на примере Юго-Восточного Кавказа) // Геотектоника. 1987. № 4. С. 31—48.
16. Яковлев Ф.Л. Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям

ее морфологии (на примере Большого Кавказа). М., 1997. 76 с.

17. *Яковлев Ф.Л.* Иерархичность линейной складчатости и комплекс морфологических и кинематических методов изучения механизмов ее образования // Структурные парагенезы и их ансамбли. М., 1997. С. 208—209.

18. *Biot M.A.* Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis // Bull. Geol. Soc. Amer. 1961. Vol. 72. P. 1595—1620.

19. *Dixon J.M., Tirrul R.* Centrifuge modelling of fold-thrust structures in a tripartite stratigraphic succession // J. Str. Geol. 1991. Vol.13, N 1. P. 3—20.

20. *Hossack J.R.* The use of balanced sections in the calculation of orogenic contraction — a review // J. Geol. Soc. London, 1979. Vol. 136. P. 705—711.

21. *Hudleston P.J., Lan L.* Rheological control on the shapes of single-layer folds // J. Str. Geol. 1994. Vol. 16, N 7. P. 1007—1021.

22. *Hudleston P.J., Stephansson O.* Layer shortening and foldshape development in the buckling of single layers // Tectonophysics. 1973. Vol. 17, N 4. P. 299—321.

23. *Ramberg H.* Strain distribution and geometry of folds // Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala. 1963. N 42. P. 1—20.

24. *Ramsay J.G., Huber M.I.* The techniques of modern structural geology. Vol. 1. Strain Analysis. London, 1983. 307 p.

Ин-т физики Земли РАН,
Москва

Поступила в редакцию
21.10.99

STUDY OF LINEAR FOLDING MECHANISM AS ONE OF TECTONOPHYSICS BRANCH

F.L. Yakovlev

The main problems of origin of linear folding are discussed. Consistent development of principles founded by M.V. Gzovsky (experimental and field studies of folded structures, correct comparison of natural structures with modeled ones etc.) allows to lay down solution of problem of folding formation. Linear folding is hierarchic phenomenon and special combination of mechanisms are responsible for each hierarchic level of structures (from intra layer objects to folded belts). The principles of main methods for definition of parameters for numerical cinematic models at the different levels structures are shortly characterized. The bucking and flattening (homogenous shortening) mechanisms and dimension of fold related shortening are determining for folds of single viscous layer and folds of layers packets. The main, additional and local formation mechanisms for tectonic zones and for its large parts are detecting as principal kind based on measuring of some geometric parameters on the first stage of research. After that the dimension of total shortening for such structures is calculated and value of advection is determinated also for structures where this mechanism was detected on the fist stage.