

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ КОНЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ СТРУКТУР ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ РАЗНОГО РАНГА: ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Ф.Л. Яковлев

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, yak@ifz.ru

Любые проблемы механизма формирования континентальной коры и вопросы разработки геодинамических моделей крупных структур тесно связаны с необходимостью реконструкции формы геологических тел и с определением величин их деформаций [Белоусов, 1962; Хаин, 1987]. Очевидно, что складчатые структуры разного масштаба являются идеальным объектом для определения величин деформации, поскольку в первую очередь именно они несут в себе эту информацию. С нашей точки зрения для исследований в этом направлении правильнее всего опираться на тектонофизические методы, физические в своей основе.

Для решения задачи определения типа и величины деформации складчатой структуры любого ранга предлагается использовать их кинематические модели как первое приближение к описанию механизма деформирования в рамках динамики. Такие кинематические модели в определенном смысле являются очередным шагом в развитии представления о механизмах формирования структур. Широко использовавшиеся до недавнего времени в тектонике описательные механизмы чаще всего являлись «умозрительными» в том смысле, что не имели цели описывать количественные связи каких-либо геометрических параметров структуры с «величиной развития» этих механизмов. В рамках практиковавшихся подходов в качестве доказательства ведущей роли или единственности действия какого-либо механизма приводились аргументы, связанные в определенную геодинамическую концепцию, но никогда не давалось комплексного сравнения геометрических параметров модельной и природной структуры. Так, для структур линейной складчатости было предложено большое количество механизмов (например «адвекция» и «пододвигание» для Кавказа [Шолпо, 1978; Дотдугев, 1986]), но все они были далеки от количественного описания, позволяющего проверить их точность на природном материале. Во всяком случае, дискуссии по этим проблемам (например, Геотектоника, 1988, № 5; 1989 № 6; 1994, № 5; 1995, № 1) были активными, но анализ на численном уровне геометрии складчатости в качестве аргументов в пользу тех или иных моделей в них не обсуждался.

Необходимо отметить существенную особен-

ность структур линейной складчатости, которая не учитывается большинством исследователей. Как известно, эта складчатость в целом может быть разделена на структуры форланда (передовые и межгорные прогибы) и структуры хинтерланда (центральные области складчатых поясов). Первые имеют крупные складки, по своему размеру сопоставимые с мощностью осадочного чехла, а потому к ним применимы все закономерности, детально описанные в учебниках по структурной геологии для складок параллельных (например: [Ярошевский, 1981]). Это – постоянство мощности толщи на крыльях и в замке, и то, что структура ограничена определенной высотой. Такие структуры активно изучались последние десятилетия методами построения сбалансированных разрезов (см. обзор в: [Прокопьев и др., 2004]). В структурах второго типа, в хинтерланде, в пределах мощного (10-20 км) осадочного чехла, состоящего из тонкослоистых осадков, развито очень большое количество складок мелких, размером до первых метров, которые имеют облик «подобных» (такие складки в идеале имеют одинаковую форму по всей высоте структуры для всех слоев толщи). Кристаллический фундамент хинтерланда, там, где он виден, в отличие от фундамента форланда всегда имеет следы со складчатых пластических деформаций [Сомин, 2000]. Описание таких складчатых структур в учебниках обычно далеко от совершенства, поскольку, как правило, подразумевается, что механизмы формирования складок «параллельных» применимы и к «подобным» [Ramsay, Huber, 1987]. В результате тектонотип структур форланда, представляющий собой сочетание крупных складок и надвигов, имеющих общий срыв по кровле жесткого фундамента, с легкостью используется для интерпретации структур хинтерланда, с механической точки зрения имеющих совершенно другие свойства, как чехла, так и фундамента. Как будет показано ниже, в результате возникают серьезные ошибки в развиваемых геодинамических моделях. В связи с этим можно в целом сказать, что центральные части подвижных поясов, занятые линейной складчатостью, пока не имеют корректного описания и интерпретации своей структуры. Разумеется, по этой причине самые общие представления о закономерностях развития континентальной земной

коры могут содержать значительные лакуны, что только подчеркивает важность работ по проблеме механизмов формирования складчатости.

В качестве основы для создания совокупности кинематических моделей, охватывающих основные ранги структур линейной складчатости (от внутрислойных включений до всего складчатонадвигового пояса), была предложена система семи иерархических уровней [Яковлев, 1997; Ребецкий и др., 2004]. Эти уровни отличаются друг от друга объемом слоистости, охватываемой определенными механизмами (точнее – кинематическими моделями, содержащими наборы механизмов), которые и формируют типичные для этого уровня структуры. Это 1) – уровень внутрислойных деформаций (искажение формы зерен и включений, предмет стрейн-анализа), 2) – уровень отдельных складок (отдельные слои), 3) – уровень складчатых доменов (серия складок в пачке слоев, крупные части осадочного чехла), 4) – уровень структурных ячеек (структуры от ядра локального антиклинория до ядра локального синклинория, осадочный чехол целиком), 5) – уровень тектонической зоны (традиционная структура, охватывает часть коры или всю кору), 6) – уровень крупной складчатой системы (например, мегантиклинорий Большого Кавказа, уровень охватывает всю литосферу), 7) – весь складчато-разрывной пояс (глубина охвата, вероятно, превышает толщину литосферы). Важно, что границы выделяемых объектов в этой системе совпадают с теми границами, в рамках которых действуют наборы механизмов [Яковлев, 2008a]. Совокупность методов исследований, основанных на таких кинематических моделях, называется *многограновым деформационным анализом структур линейной складчатости*.

Структуры разного ранга имеют неодинаковое значение для решения наиболее важных геотектонических задач – механизмы формирования структур небольших менее интересны, чем механизмы формирования структур крупных. Однако именно малые структуры наиболее понятны, а интерпретация наиболее крупных, как правило, дискуссионна. С этой точки зрения структуры 2-го и 3-го уровня – складки и домены (совокупности складок) представляют собой тот минимальный размер, который может быть использован для решения проблем тектоники, связанных с построением геодинамических моделей. Ниже на примере Большого Кавказа будут показаны шесть примеров решения конкретных проблем строения и механизмов формирования структур с возрастанием размера от малых к крупным.

Первые два примера показывают решения задач при исследовании локальных структур.

Пример 1. Исследование механизмов формирования Воронцовской структуры Северо-Западного Кавказа. Используемая в этой работе модель формирования складок пачек слоев реализует совместное действие изгиба и сплющивания в пределах компетентного слоя. Эти механизмы имеют очень простое описание изменений геометрии, что позволило составить компьютерную программу для расчетов вариантов развития складки (рис. 1). На базе этой модели была построена номограмма (рис. 2) для определения величины укорочения складок в направле-

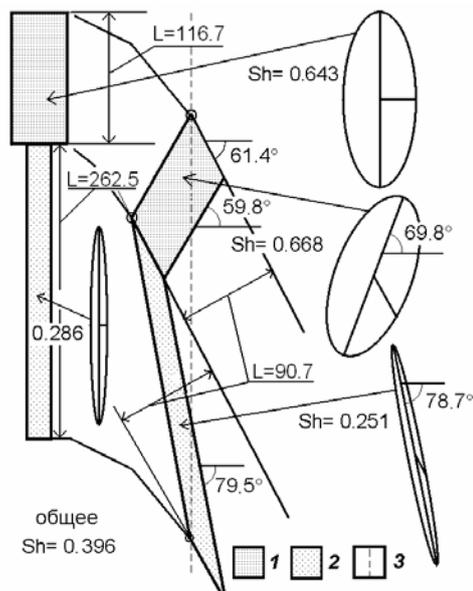


Рис. 1. Модель формирования складки пачек слоев (по [Яковлев, 2002], с изменениями). Значения рассчитанных параметров складки: исходные мощности слоев 75 и 75, длина отрезка крыла 75; общее сокращение $Sh = 0.396$; показаны цифрами величины укорочения по эллипсам деформаций Sh (показана длинная ось и ориентировка слоя); мощности слоев L (длина отрезка крыла вдоль слоя равна 62.0); углы наклонов отрезков и осей эллипсов

1 – компетентный слой; 2 – некомпетентный слой; 3 – ориентировка осевой плоскости

нии, перпендикулярном к осевой плоскости [Яковлев, 2002]. В подошве Воронцовского покрова для 39 складок по нескольким фотографиям забоя подземной выработки были измерены наклоны осевых плоскостей и величина укорочения (рис. 3). Наклоны осевых плоскостей были важны, поскольку они являются существенным параметром для фиксации геометрии домена, которая преобразуется в описание эллипсоида деформации для некоторого объема слоистости (рис. 4). Полученный тренд для природных складок в пространстве двух параметров (диаграмма $X - Y$) сравнивался с трендами двух специально созданных численных (кинематических) моделей – горизонтального простого сдвига и латерального укорочения (рис. 5). Первая модель

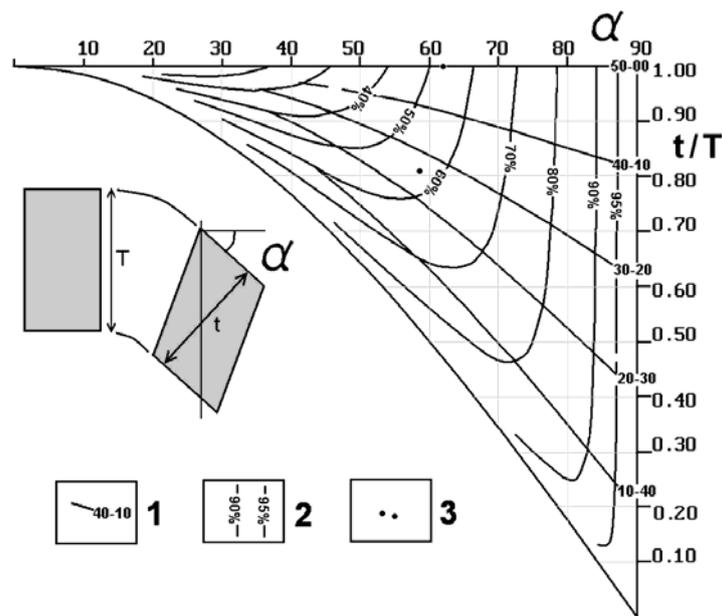


Рис. 2. Номограмма для определения величины укорочения в складках пачек слоев по геометрии компетентного слоя ([Яковлев, 2002], с изменениями). Показана система замеров угла наклона слоя относительно перпендикуляра к осевой плоскости, мощности слоя на крыле (t) и его мощности в замке (T), которые откладываются по осям номограммы. В пространстве номограммы нанесены изолинии величины укорочения (в %), и соотношения величин приращений механизмов поворота (изгиба) и сплющивания при вычислениях

1 – изолинии соотношения величин механизмов; 2 – изолинии величины укорочения; 3 – точки замеров геометрии складок (α , t/T), положение которых в поле изолиний дает решение для определения величины укорочения и соотношения приращений механизмов

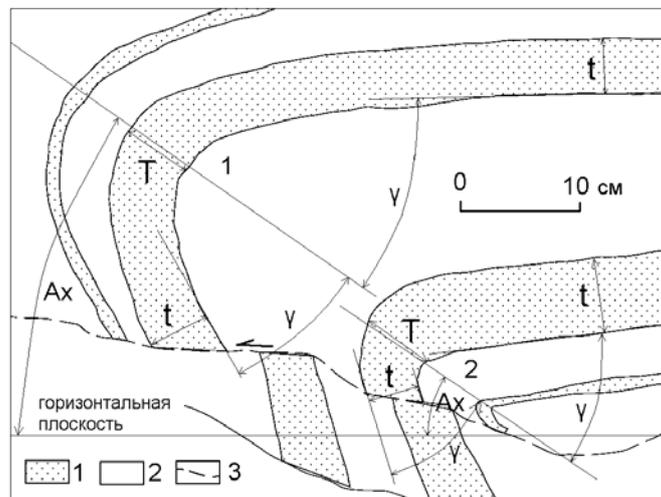


Рис. 3. Рисунок по фотографии с показом замеряемых геометрических элементов складки. Ax – наклон осевой плоскости относительно горизонта, γ – угол наклона слоя относительно осевой плоскости ($\alpha=90-\gamma$), t – мощность слоя на крыле складки, T – мощность слоя в замке складки

1 – алевролиты, 2 – аргиллиты, 3 – поверхность смещения по небольшому разрыву

может отвечать гравитационному оползанию, не требующему горизонтального укорочения всего складчатого сооружения, а вторая обязательна при боковом давлении, возникающем при складкообразовании и общем укорочении структуры. Совпадение природного тренда с первой моделью в комбинации с рядом геологических фактов показало высокую степень вероятности формирования этого покрова в результате гравитационного оползания, а не бокового давления

[Yakovlev et al., 2007]. Анализ геологического развития района (Северо-Западный Кавказ, граница складчатости Большого Кавказа и Закавказского массива в районе г. Сочи, рис. 6) показал [Яковлев и др., 2008], что в определенный момент (в период 22–15 млн. лет) действительно мог существовать такой наклон структуры, который обеспечивал перемещение пластины покрова мощностью не более 1.5 км на расстояние минимум 15 км. Таким образом, было определено,

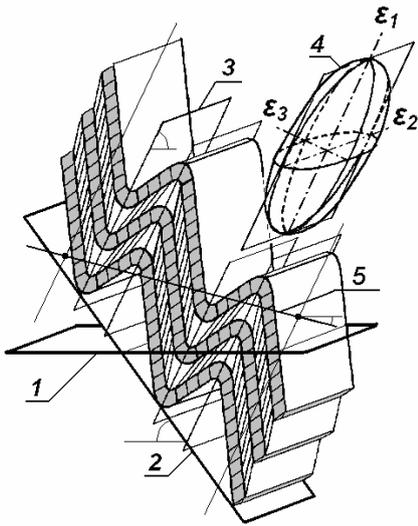


Рис. 4. Элементы геометрии складчатого домена и их замеры (по [Yakovlev, Voitenko, 2005], с изменениями)

1 – горизонтальная плоскость; 2 – плоскость зеркала складок, угол ее наклона; 3 – осевая плоскость, угол ее наклона; 4 – эллипс деформаций (по результатам определения величины укорочения); 5 – линия профиля, ее длина и угол наклона

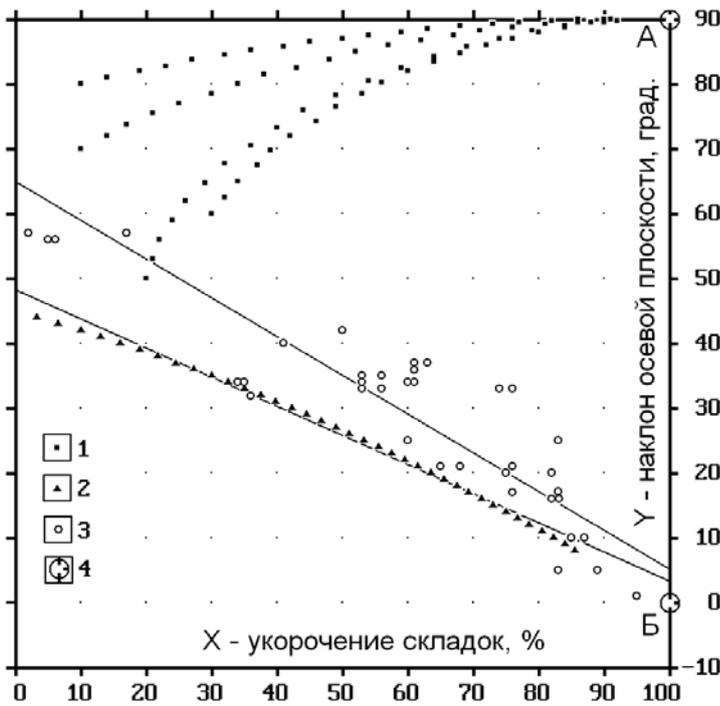


Рис. 5. Сравнение трендов моделей латерального укорочения и горизонтального сдвига с замерами природных складок. Используется диаграмма рассеяния (X – Y). Показаны две линии регрессии для двух совокупностей точек: для модели горизонтального сдвига и для природных складок

1 – модель горизонтального укорочения, четыре варианта расчетов, 2 – модель горизонтального сдвига, 3 – замеры природных складок, 4 – аттракторы: А – для модели горизонтального укорочения (бокового давления), Б – для модели горизонтального простого сдвига (гравитационного соскальзывания)

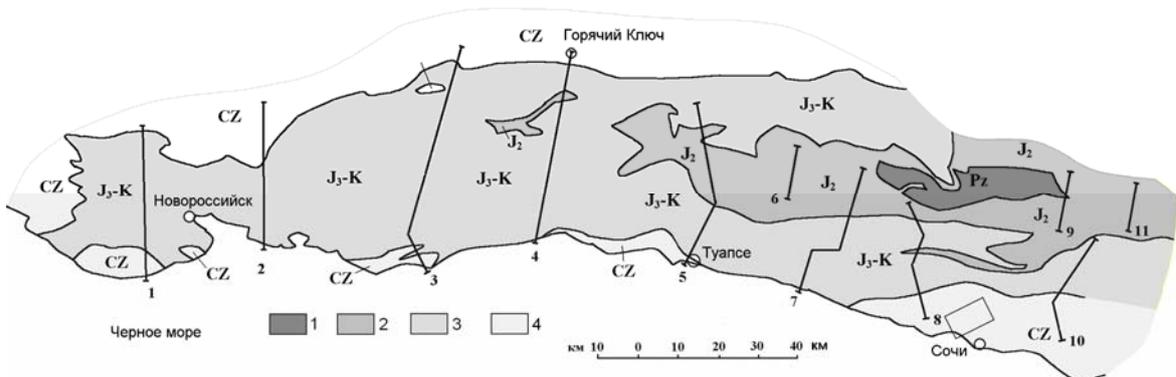


Рис. 6. Схематическая геологическая карта Северо-Западного Кавказа. Показаны 11 структурных пересечений, используемые в исследованиях происхождения структур разного ранга. Небольшим прямоугольником в районе г. Сочи отмечен район работ по Воронцовской структуре

1 – палеозойские метаморфические породы фундамента; 2 – отложения средней юры, терригенные флишеидные сланцы и песчаники; 3 – отложения верхней юры, мела, палеоцена и эоцена, в основном терригенно-карбонатный флиш; 4 – отложения олигоцена, неогена и антропогена, моласса

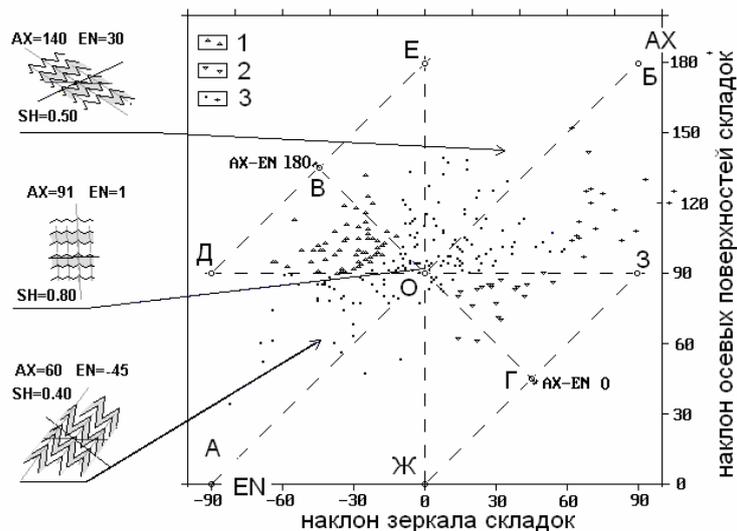


Рис. 8. Распределение замеров геометрии доменов складчатой структуры Северо-Западного Кавказа для диаграммы распределения «наклон зеркала складок EN – наклон осевых поверхностей AX» (по [Яковлев, 2003], с изменениями). Для точек «приразломной складчатости» (условные знаки 1 и 3, расположенные в секторах Д-О-Е и Ж-О-З) наблюдается возрастание средней величины укорочения SH при приближении к линиям Д-Е и Ж-З. Слева показаны домены с морфологией, соответствующей параметрам точек на диаграмме (стрелки), север справа.

1 – приразломная складчатость, вергенция на юг; 2 – приразломная складчатость, вергенция на север; 3 – совокупность доменов с «основными» механизмами

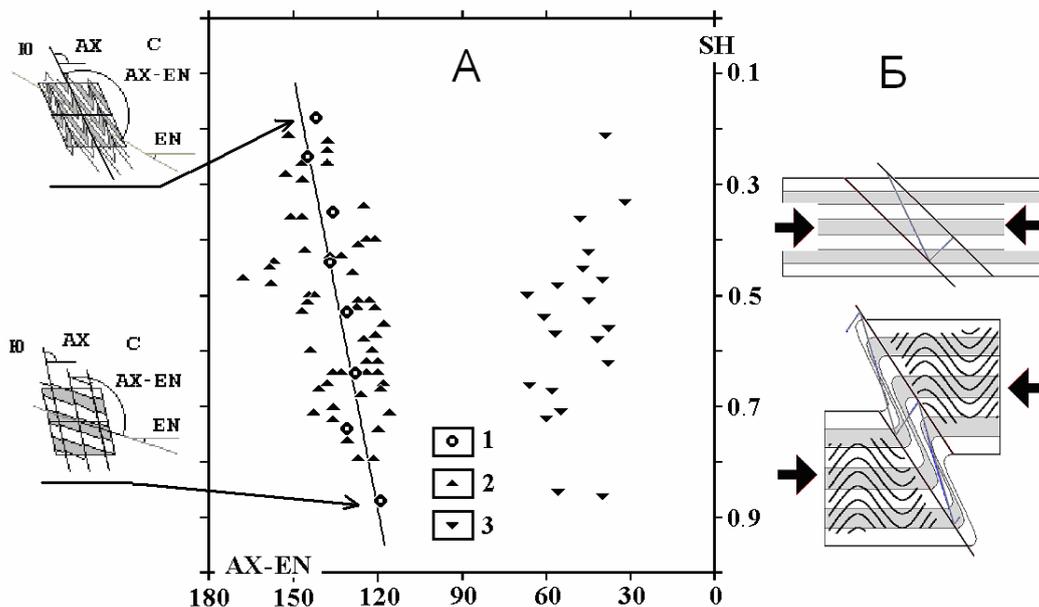


Рис. 9. А – диаграмма распределения параметров природных доменов SH и AX-EN (по [Яковлев, 2003], с изменениями, вдоль линии В-Г на рис. 8); Б – общая схема эволюции структур – простое сдвигание вдоль наклонной плоскости в комбинации с горизонтальным сплющиванием

1 – точки осреднения для значений укорочения SH для природных доменов (с шагом 0.1, начиная с 0.9); 2 – точки с южной вергенцией; 3 – точки с северной вергенцией

уровней 4 и 5 (структурные ячейки и тектонические зоны). Результаты показаны ниже в примерах 3–5.

Пример 3. Построение трехмерной модели складчатого чехла Северо-Западного Кавказа. Указанные выше (рис. 6) пересечения были ис-

пользованы для построения квазитрехмерной трехстадийной модели развития структуры чехла Северо-Западного Кавказа [Яковлев, 20086]. Пересечения были разбиты на 244 домена и 42 структурных ячейки. Принципиальные пространственные соотношения между складками,

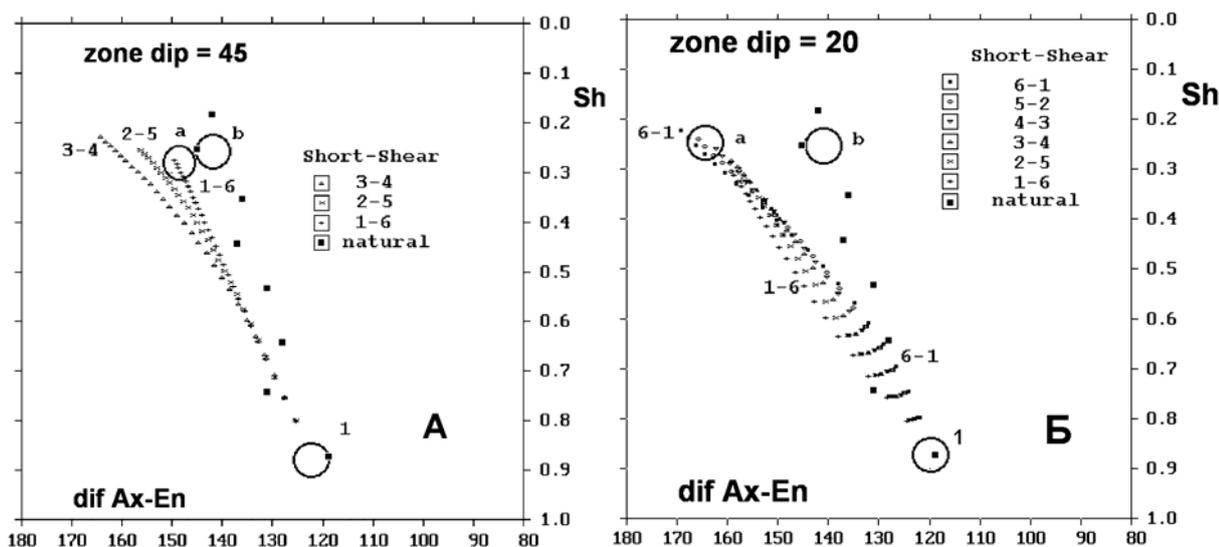


Рис. 10. Диаграммы сравнения осредненных природных параметров SH и AX-EN (квадраты, natural, от кружка «1» до кружка «b») с модельными трендами (от кружка «1» до кружка «a»). Разными значками показаны сочетания инкрементов укорочения и простого сдвига. А – для серии с начальным наклоном зоны 45° (угол скальвания при горизонтальном сжатии). Б – для серии с начальным наклоном зоны 20° (доскладчатый наклон слоистости, что может соответствовать срыву вдоль подошвы чехла). Близость кружков «a» и «b» для рисунка А показывает, что вариант угла скальвания является предпочтительным

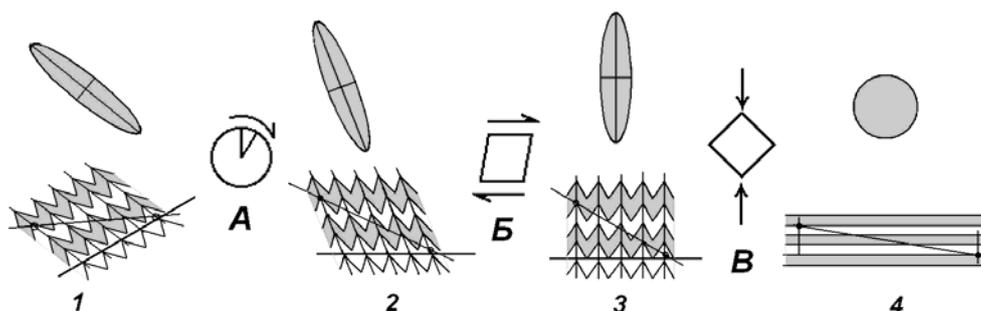


Рис. 11. Кинематические операции восстановления доскладчатого состояния домена и преобразования деформационного эллипса в круг [Яковлев, 2008в]. А – операция поворота; Б – операция горизонтального простого сдвига; В – операция чистого сдвига (горизонтальное растяжение). Состояния домена: 1 – исходное; 2 – после поворота; 3 – после простого горизонтального сдвига; 4 – доскладчатое состояние

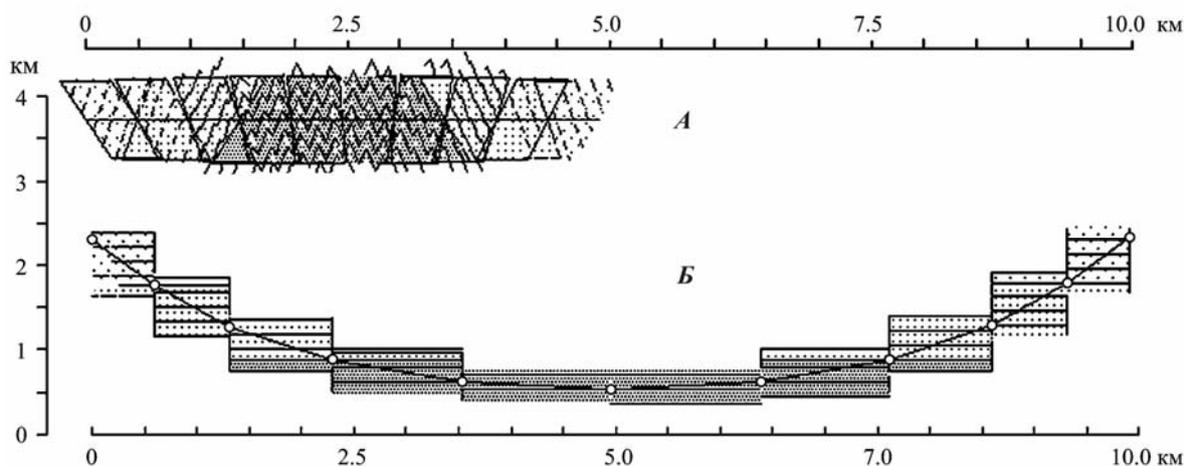


Рис. 12. Компьютерная программа построения сбалансированного разреза по геометрии складчатых доменов: тестирование метода (использованы копии экрана) [Яковлев, 2008в]. А – складчатая структура (длина условного современного профиля из 10 доменов – 5 км) рассчитанная для двухэтапного механизма: первый этап – адвекция с поворотом на 60° в центре ячейки и второй этап – общее укорочение 50%; Б – доскладчатая структура, восстановленная в результате работы программы. Разный крап в доменах подчеркивает стратиграфические уровни слоистой толщи. Поскольку исходная длина структуры составляла 10 км, а восстановленная длина доскладчатой структуры 9.9 км, то ошибка вычислений – около 1%

доменами, структурными ячейками и тектоническими зонами видны на рис. 13. В каждом домене были замерены структурные признаки (рис. 4), затем были рассчитаны доскладчатые координаты для доменов и пересечений. Для каждой выделенной ячейки была определена величина укорочения, исходная мощность осадочно-го чехла (по литературным данным) и «глубина» позиции выходящих в обнажения пород в новой (постскладчатой) мощности колонны осадков. Для основных стратиграфических реперов (подошвы юры, мела и палеогена) на основании этих 42 значений был построен рельеф для трех

стадий: 1) доскладчатой постседиментационной, 2) постскладчатой доорогенной, 3) посторогенной современной (рис. 14). Было показано, что полученный современный рельеф подошвы чехла имеет в среднем глубину -13 км (от -2 до -32 км). По пересечению г. Туапсе (№ 5) рельеф кровли фундамента в целом совпадает с последними геофизическими данными [Шемпелев и др., 2001], но противоречит схеме пододвигания Черноморской плиты под Кавказ, в которой средняя глубина фундамента составляет 5-7 км, и плоскость detachment по его кровле располагается субгоризонтально [Robinson et al., 1996].

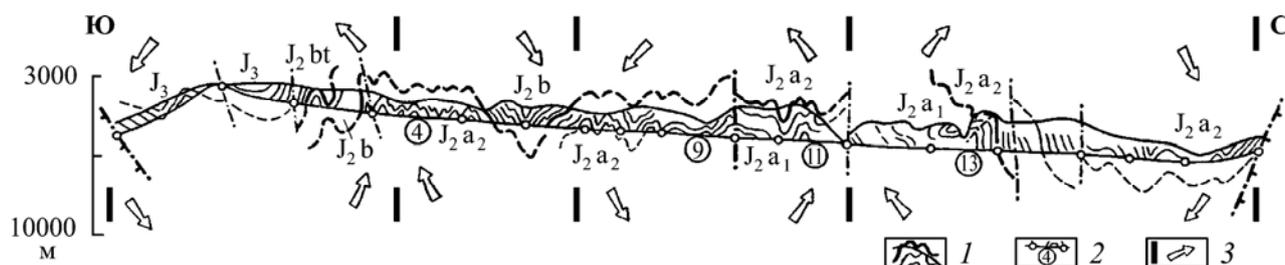


Рис. 13. Соподчиненные отношения тектонической зоны (весь профиль), структурных ячеек, доменов и отдельных складок (на примере профиля по р. Кудиялчай, Тфанская зона, Юго-Восточный Кавказ; по: [Рогожин, Яковлев, 1983], с изменениями). Выделены 17 доменов и четыре структурных ячейки

1 – отдельные складки; 2 – границы домена (кружки) и его номер, номера показаны выборочно; 3 – границы структурных ячеек и общее направление движения вещества в них

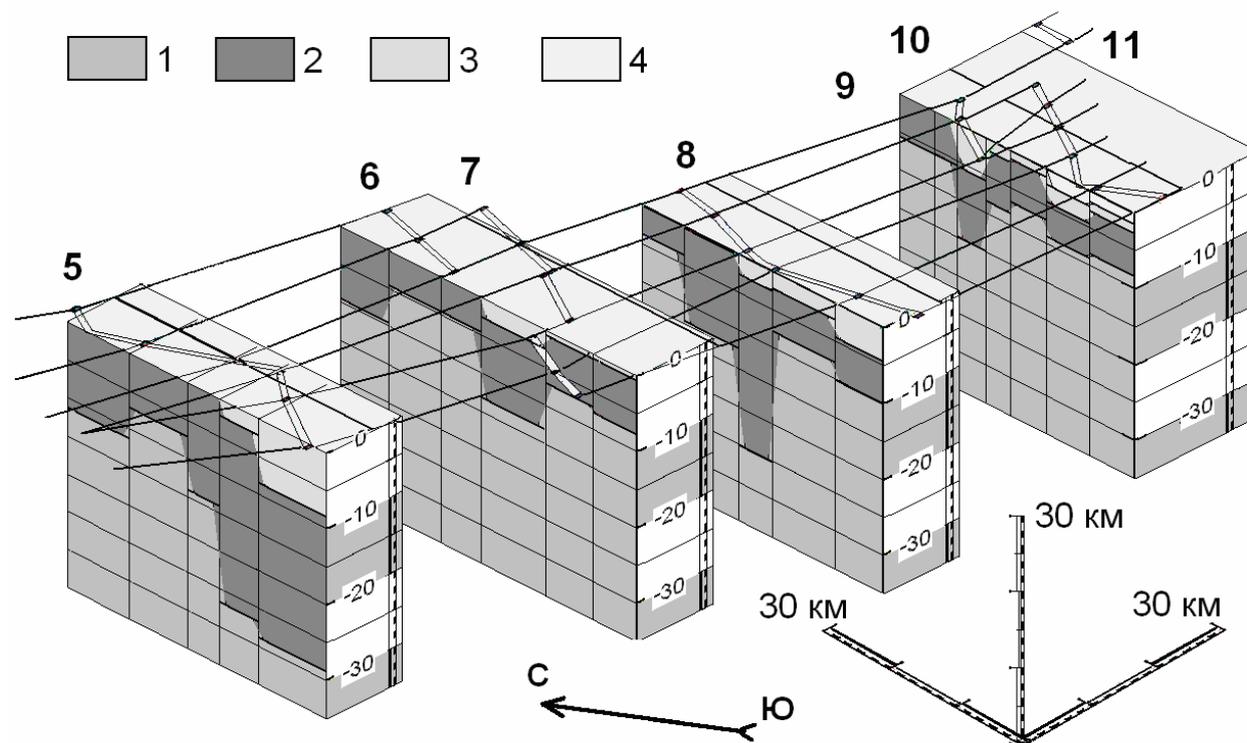


Рис. 14. Часть трехмерной модели осадочного чехла Северо-Западного Кавказа, третья стадия, современная структура, аксонометрическая проекция. Показано пространство от г. Туапсе (профиль 5, юг) до г. Адлера (профиль 10, юг), разный тон заливки соответствует фундаменту, юрским отложениям, меловым и палеогеновым. Используются значения глубин для реперных уровней в структурных ячейках

Для разрезов: 1 – фундамент, 2 – юрские отложения, 3 – меловые отложения, 4 – палеогеновые отложения

Пример 4. Определение амплитуд орогенного поднятия для Северо-Западного Кавказа. На основании этой же работы [Яковлев, 2008 а; Yakovlev, 2008] были вычислены амплитуды постскладчатого горообразующего поднятия (точнее, были определены те объемы осадков, которые оказались размывы). Средняя амплитуда поднятия составила 10 км (от 0.5 до 23 км в разных ячейках), что превышает общепринятые величины на 0.5–1 порядок (рис. 15). Была выявлена общая положительная корреляция амплитуды поднятия с накопленной мощностью чехла и величиной укорочения. Значительное отставание по времени поднятия от складчатого укорочения структуры [Трифонов и др., 2006; Трифонов, 2008] указывает на существование связи горообразования с петрологическими изменениями пород коры и мантии.

Пример 5. Выявление структуры переходной зоны «межгорный массив» – «складчатое сооружение». С использованием метода построения сбалансированных разрезов по геометрии доменов была восстановлена структура Чиаурской зоны Большого Кавказа (рис. 16). Затем путем сравнения полученной структуры со строением Закавказского массива была выявлена структура перехода «форланд – хинтерланд» [Яковлев, 2006а; Yakovlev, 2006]. Обычная трактовка (рис. 17) этой границы связана с идеей поддвижения массива под Большой Кавказ (например: [Дотдугев, 1986]). Чиаурская зона (рис. 18), имела доскладчатую структуру (рис. 19) с исходной мощностью осадков 12-15 км и шириной зоны 60-65 км. Для четырех выделенных ячеек были определены значения укорочения (L_1/L_0 , с юга на север) 0.56, 0.42, 0.40, 0.41.

Получив современные постскладчатые «мощности» чехла для четырех ячеек и, помещая породы соответствующего возраста (глубины) на уровень рельефа, были найдены примерные позиции кровли фундамента: 19, 22, 25 и 17 км (рис. 20). С учетом примерных мощностей осадков в Закавказском массиве и на основании развитых там слабых деформаций при сопоставлении с указанными данными было определено, что для возникновения имеющегося сочетания этих структур в конце палеоцена (до основной складчатости) необходимо было иметь на этой границе сброс с амплитудой около 5-7 км. В процессе складкообразования и укорочения структур Чиаурской зоны амплитуда сброса должна увеличиться до 12-15 км (рис. 20). Простой геометрический анализ этой ситуации (рис. 21) показал, что верхняя часть колонны осадков чехла может локально надвигаться на межгорный массив в случае, если массив испытывает погружение, но регионально структура все равно должна представлять собой сброс с амплитудой 10-15 км по кровле фундамента. На основании этого был сделан вывод, что схема поддвижения Закавказского массива под Большой Кавказ не может существовать. Соответственно, положение фундамента (и детачмента в подошве чехла) на глубинах 5-8 км по схеме С.И.Дотдугева (рис. 17) не является корректным. Заметим, что ряд исследователей, опираясь на геологические данные, также отрицают существование пологих надвигов и заметные горизонтальные перемещения по ним для Большого Кавказа в других его районах [Сомин, 2000; Расцветаев и др., 2004]. Выявленное парадоксальное сочетание укорочения структуры и увеличения амплитуды сброса, невозможное при внешнем сжатии, объясняется ниже.

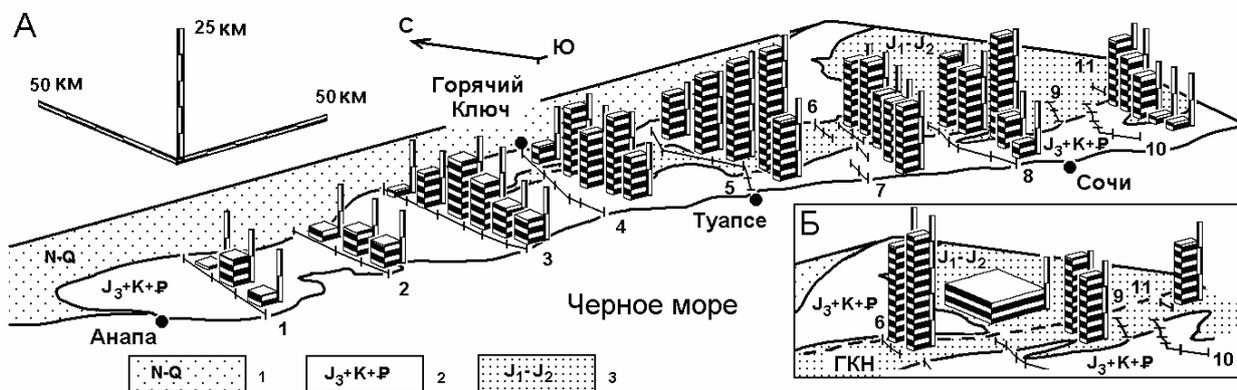


Рис. 15. Распределение амплитуд поднятия по структуре Северо-Западного Кавказа (по материалам [Яковлев, 2008 б]). А – схематическая геологическая карта: 1 – неоген-четвертичные отложения, 2 – отложения верхней юры, мела и палеогена, 3 – отложения нижней и средней юры. Б – карта – врезка, показывающая амплитуды поднятия для блока севернее Главного Кавказского надвига (ГКН) и для пересечений 6, 9, 11

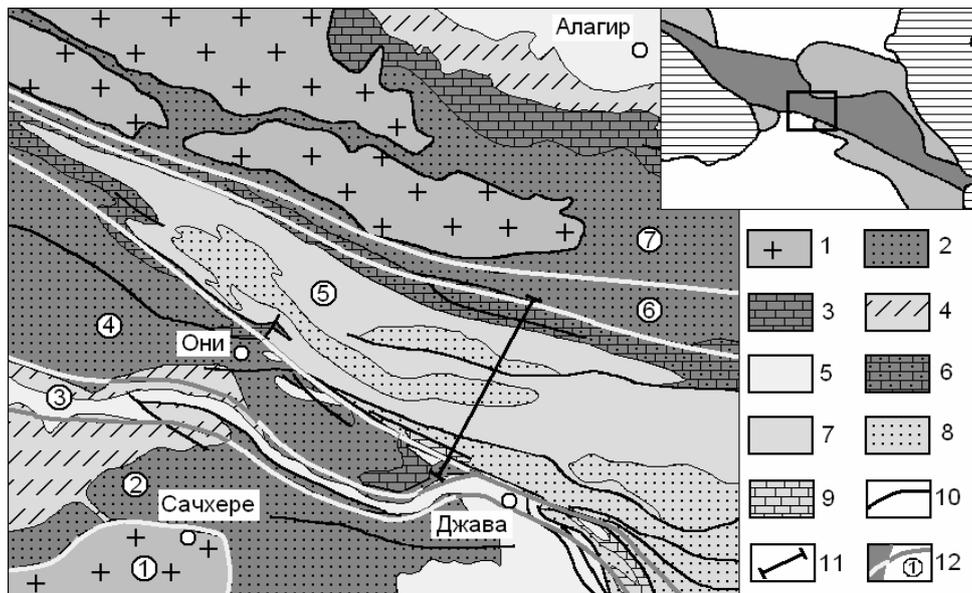


Рис. 16. Схематическая геологическая карта части Чиаурской тектонической зоны Большого Кавказа (на врезке справа сверху показано положение района относительно структуры Большого Кавказа и молассовых прогибов). По материалам [Геологическая..., 1976]

1 – выходы фундамента палеозойского и до-кембрийского возраста, 2 – отложения нижней и средней юры; 3, 4, 5 – отложения за пределами Чиаурской тектонической зоны: 3 – верхней юры, 4 – мела, 5 – палеогена-неогена; 6–9 – флишевые отложения Чиаурской тектонической зоны: 6 – верхней юры, 7 – нижнего мела (валанжин), 8 – нижнего мела (готерив-альб), 9 – верхнего мела, 10 – разрывы, 11 – линия структурного пересечения, 12 – границы тектонических зон и их номера: 1 – Дзирульский массив, 2 – Окрибо-Сачхерская зона, 3 – Рача-Лечхумская шовная зона, 4 – Гагро-Джавская зона, 5 – Чиаурская зона, 6 – Дигоро-Осетинская зона, 7 – другие зоны северного склона Большого Кавказа

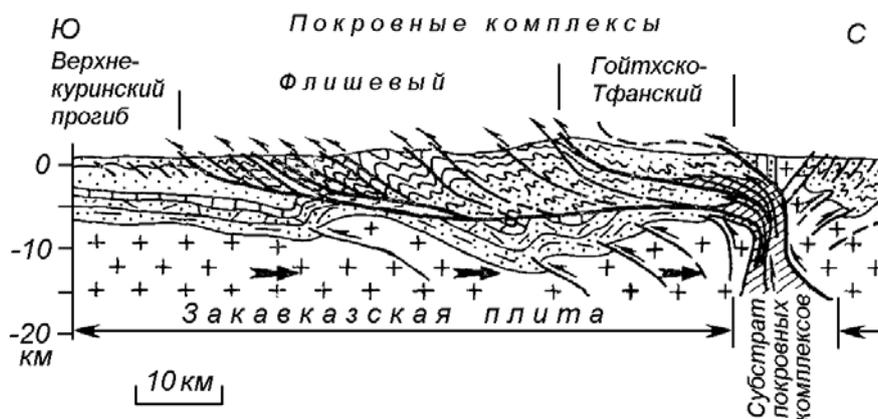


Рис. 17. «Концептуальное» пересечение через Большой Кавказ в районе Чиаурской тектонической зоны, показывающее пододвижение Закавказской плиты как основную причину формирования структуры Большого Кавказа (по [Дотдугев, 1986], с изменениями)

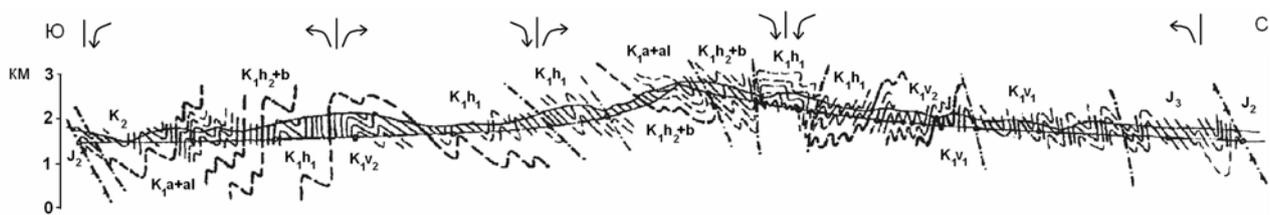


Рис. 18. Структурный разрез [Яковлев, 1997], составленный по геологической карте и замерам в поле параметров геометрии складок по пересечению р. Кешельта – р. Гинат (рис. 16). Разрез полностью пересекает Чиаурскую тектоническую зону Большого Кавказа. В пересечении было выделено 26 доменов, по параметрам которых была восстановлена доскладчатая структура (рис. 19)

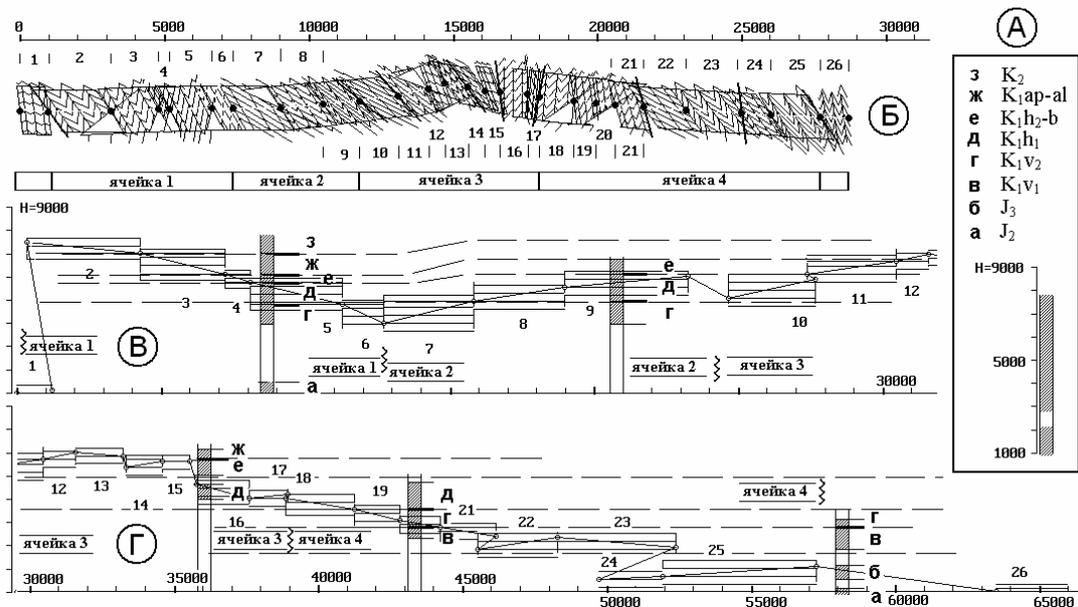


Рис. 19. Материалы восстановления доскладчатого разреза Чиаурской зоны (по [Яковлев, 2006a]). А – обозначения восстановленных стратиграфических горизонтов и колонка осадков (заштрихованная часть обозначает объемы, по которым прошла линия профиля). Б – компьютерное изображение структурного пересечения (копия экрана), построенное по результатам замеров параметров природной структуры. Показаны границы доменов (крупные точки) и их номера, а также границы ячеек. В – восстановленная южная часть профиля, на которой показаны домены с горизонтальной слоистостью, линии профиля, разрывы, стратиграфические границы и колонны осадков. Г – восстановленная северная часть профиля (продолжение)

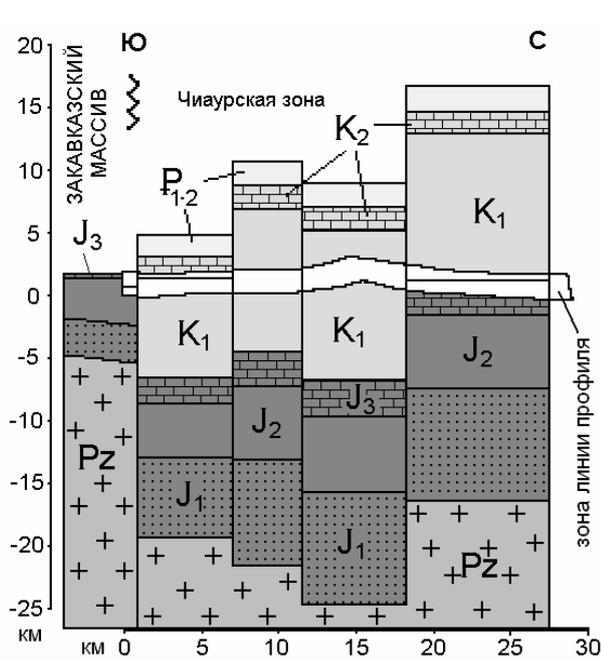


Рис. 20. Общая схема рельефа кровли фундамента для Закавказского массива (Гагро-Джавская тектоническая зона, рис. 16) и Чиаурской тектонической зоны. Время основной складчатости в Гагро-Джавской зоне – рубеж средней и поздней юры, в Чиаурской зоне – рубеж эоцена и олигоцена. Показаны положения основных стратиграфических подразделений (разный тон заливки и крап). Положения границ рассчитывались, исходя из 1) общей мощности чехла 13.5 км (ориентировочно), 2) указанных в тексте величин укорочения для структурных ячеек, 3) положения колонны осадков ячейки на линии профиля

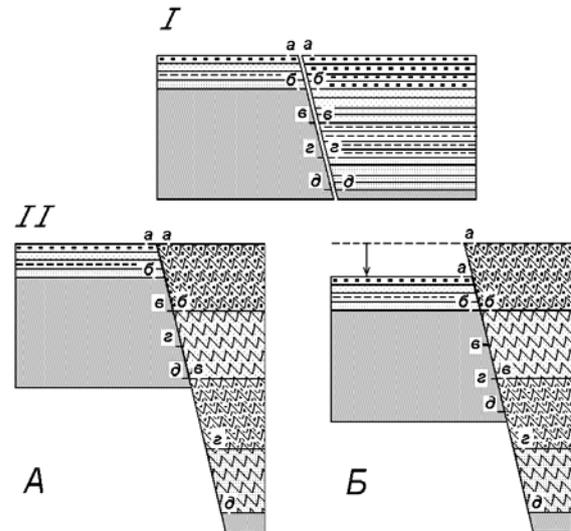


Рис. 21. Принципиальная схема соотношения структуры форланда – предгорного прогиба и хинтерланда – внутренней части складчатой системы. I – стадия осадконакопления, II – стадия складчатости, укорочение блока сопровождается соответствующим увеличением его вертикального размера. Слева от разлома показан стабильный блок, справа – складчатый блок. Показаны реперные уровни (от а-а до д-д), для конца первого этапа – без смещения. Для варианта II А складчатой стадии смещения отсутствует по реперу «а-а» (высокое положение стабильного блока, северо-западнее г. Джава, рис. 16). Для варианта II Б смещения отсутствуют по реперу «б-б» (погруженное положение стабильного блока, юго-восточнее г. Джава, рис. 16), по реперу «а-а» наблюдается локальный надвиг, (обычно ошибочно принимаемый за структуру регионального ранга)

Сочетание структур форланда (предгорных или межгорных прогибов) и смятых в линейные тесно сжатые мелкие складки мощных флишеидных толщ хинтерланда является достаточно распространенной ситуацией, для интерпретации которой обычно используется схема с пологими надвигами не только в форланде, но и в хинтерланде. Как было показано выше, возможно и другое, прямо противоположное объяснение. Работы по уточнению ситуации в разных районах могут дать существенные уточнения в геодинамические модели. Для более крупных объектов (уровень 6 – мегантиклинорий) данных о деформациях складчатых структур недостаточно для решения задачи построения геодинамической схемы. Характер изменений в структурах такого масштаба связан не только с геометрией геологических тел, но и с изменением их состава и плотности, поэтому без привлечения данных петрологии и геохимии численно описать механизмы формирования этих структур невозможно. Только в качестве гипотезы можно выдвинуть некоторые предположения о движущих силах, намечая возможные направления исследований.

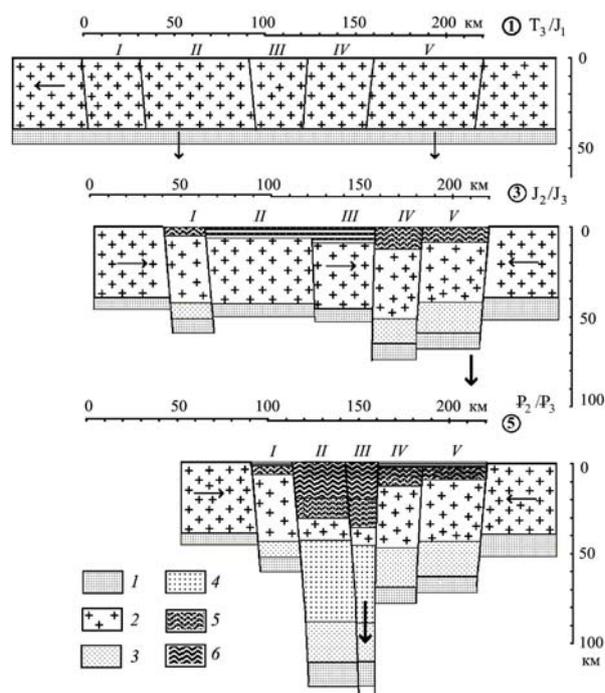
Рис. 22. Принципиальная схема развития структуры Большого Кавказа [Яковлев, 2008в] с соблюдением объемов пород и величин деформаций. Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковы. Цифры в кружках – стадии развития, выборочно: 1 – начальные мощности коры и положения тектонических зон, 3 – результат первого эпизода складчатости на рубеже средней – поздней юры, 5 – результат основной складчатости на рубеже эоцена – олигоцена. Тектонические зоны: I – Гагро-Джавская, II – Чиаурская, III – Тфанская, IV – Шахдагская, V – Известняковый Дагестан

1 – исходная мантия; 2 – земная кора без осадочного слоя; 3, 4 – часть коры, предположительно получившая свойства мантии: 3 – в период первого эпизода складчатости J_2/J_3 , 4 – в период основной складчатости Pg_2/Pg_3 ; 5 – отложения J_1 и J_2 ; 6 – отложения J_3 , K, Pg_1 , Pg_2

Общие выводы. Как показано в приведенных выше примерах, тектонофизические методы исследования многограновых структур линейной складчатости дают возможности:

- 1) получать надежные данные о механизмах формирования природных структур линейной складчатости на уровне кинематики деформационных процессов;
- 2) получать корректную информацию о величинах

Пример 6. Гипотетическая схема альпийского развития Большого Кавказа: коллизионная структура с внутренней активностью. Анализ совокупности относительно достоверной геометрии осадочного чехла и истории развития Большого Кавказа показал [Yakovlev, 2005b; Яковлев, 2006б; Яковлев, 2008в], что крутое положение основных разломов и найденные амплитуды укорочения всей структуры указывают на положение бывшей границы Мохо (исходные 40 км глубины на начало юры) примерно на глубине 90-110 км. Соответственно, необходимые преобразования пород коровых в мантийные могут быть основной причиной сначала конседиментационного погружения, затем «обрушения» с общим укорочением и складчатостью (рис. 22). Это согласуется с тем фактом, что собственно рост горного сооружения Большого Кавказа на современном этапе начался с существенной задержкой после основной складчатости. По этой гипотезе предлагается считать, что коллизионная структура Кавказа имеет внутренний источник тектонической активности.



нах деформации, а также выявлять общий характер доскладчатой и современной структуры всего осадочного чехла на пространствах в первые десятки километров и на глубины до 20-40 км;

- 3) получать информацию о возможности применения той или иной геодинамической схемы, а также об основных параметрах геодинамической модели, которая может быть предложена для конкретных районов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке в 2008 г. программой № 6 Отделения

наук о Земле РАН «Геодинамика и механизмы деформирования литосферы».

ЛИТЕРАТУРА

- Белоусов В.В.* Проблема происхождения складчатости (вступительные замечания) // Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М.: Изд. АН СССР. 1962. С. 3-8.
- Геологическая карта Кавказа. М-б 1:500 000. Гл. ред. Д.В. Наливкин. Л.: ВСЕГЕИ. 1976.
- Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П.* Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. Тбилиси: Мецниереба. 1989. 61 с.
- Дотдугев С.И.* О покровном строении Большого Кавказа // Геотектоника. 1986. № 5. С. 94-106.
- Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В.* Разломы: (Морфология, геометрия и кинематика): Учеб. Пособие // Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН. 2004. 148 с.
- Расцветаев Л.М., Греков И.И., Компаниец М.А., Корсаков С.Г., Литовко Г.В., Письменный А.Н., Пруцкий Н.И., Трофименко Е.А., Энна Н.Л.* Глубинное строение Большого Кавказа: содвиговая модель. // Эволюция тектонических процессов в истории Земли: Тез. докл. Новосибирск: Изд. СО РАН, филиал «Гео». 2004. Т. 2. С. 100-103.
- Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л.* Тектонофизика. // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика». СПб.: Изд. ВСЕГЕИ. 2004. С. 121-134.
- Рогожин Е.А., Яковлев Ф.Л.* Опыт количественной оценки морфологии складчатости Тфанской зоны Большого Кавказа // Геотектоника. 1983. № 3. С. 87-98.
- Сомин М.Л.* О структуре осевых зон Центрального Кавказа // Докл. РАН. 2000. Т. 375, № 5. С. 662-665.
- Трифонов В.Г., Додонов А.Е., Артюшков Е.В., Бачманов Д.М., Миколайчук А.В., Вишняков Ф.А., Зарщиков А.А.* Возрастание скорости новейшего горообразования в позднем плиоцен-квартере и его причины (на примере Центрального Тянь-Шаня) // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли. Материалы XXXIX Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2006. Т. 2. С. 315-319.
- Трифонов В.Г.* Возраст и механизмы новейшего горообразования // Материалы XLI Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2008. Т. 2. С. 349-353.
- 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.
- Шемпелев А.Г., Пруцкий Н.И., Фельдман И.С., Кухмазов С.У.* Геолого-геофизическая модель по профилю Туапсе–Армавир // Тектоника неогена: общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС. 2001. Т. 2. С. 316-320.
- Шолто В.Н.* Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра. 1978. 176 с.
- Шолто В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А.* Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука. 1993. 192 с.
- Яковлев Ф.Л.* Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа) // М.: ОИФЗ РАН. 1997. 76 с.
- Яковлев Ф.Л.* Исследование механизма образования линейной складчатости как одно из направлений тектонофизики // Бюлл. МОИПа, отд. геол. 2001. Т. 76, вып. 4. С. 7-15.
- Яковлев Ф.Л.* Исследования процессов и механизмов развития пликативных деформаций в земной коре (обзор существующих методических подходов) // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 311-332.
- Яковлев Ф.Л.* Механизмы образования линейной складчатости в структурах разного ранга – модели и природные примеры // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность. Новосибирск: 2003. С. 216-220.
- Яковлев Ф.Л.* О построении рельефа поверхности раздела чехол-фундамент Большого Кавказа на основе определения величин сокращения складчатых структур // Материалы XXXIX тектонического совещания. М. ГЕОС. 2006а. Т. II. С. 411-415.
- Яковлев Ф.Л.* Большой Кавказ – коллизионная структура с внутренней активностью (автореф. докл. 13.04.2004) // Бюлл. МОИПа, отд. геол. 2006б. Т. 81, вып. 1. С. 89-90.
- Яковлев Ф.Л.* Многограновый деформационный анализ структур линейной складчатости // Доклады Академии Наук. 2008а. Т. 422, № 3. С. 371-376.
- Яковлев Ф.Л.* Исследование постскладчатого горообразования – первые результаты и подходы к диагностике механизмов на примере Северо-Западного Кавказа // Материалы XLI Тектони-

- ческого совещания. М.: ГЕОС. 2008б. Т. 2. С. 510-515.
- Яковлев Ф.Л.* Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости // Геофизические Исследования. 2008в. Т. 9. № 1. С. 56-75.
- Яковлев Ф.Л., Маринин А.В., Сим Л.А., Гордеев П.П.* Поля тектонических напряжений и поля деформаций Воронцовского покрова (Северо-Западный Кавказ) // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лабораторией тектонофизики в ИФЗ РАН. Изд. ИФЗ РАН. 2008г. С. 319-333.
- Ярошевский В.* Тектоника разрывов и складок. Пер. с польск. // М.: Недра. 1981. 245 с.
- Ramsay J.G., Huber M.I.* The techniques of modern structural geology. V. 2. Fold and fractures. London: Acad. Press. 1987. P. 308-700.
- Robinson A.G., Rudat J.H., Banks C.J. & Wiles R.L.F.* Petroleum geology of the Black Sea. Marine and Petroleum Geology. 1996. 13(2). P. 195-223.
- Yakovlev F.* Inclined zones of ductile simple shear in folded structures of the North-West Caucasus – comparison of natural data and model // Geophysical Research Abstracts. V. 7. 06236. 2005a.
- Yakovlev F.* Prognosis of structure of the main boundaries for the Earth's crust based on data of deformations estimations in a folded Alpine sedimentary cover, the example of the Great Caucasus // Geophysical Research Abstracts. V. 7. 07160. 2005b
- Yakovlev F.L., Voitenko V.N.* Application of the deformation tensor conception for the estimation of deformations in different-scale folded structures // Proceedings of VII International Interdisciplinary symposium and International Geoscience Programme (IGCP-476) «Regularity of structure and evolution of geospheres», Vladivostok, 20-25 September 2005. P. 66-69.
- Yakovlev F.L.* Study of Comparative Roles of Thrusts and Normal Faults in the Collision Structure of the Greater Caucasus Based on Balanced Section of the Hinterland // Geophysical Research Abstracts, V. 8. 09201. 2006.
- Yakovlev F.; Sim L.; Marinin A.* Tectonic paleostress fields and deformation state of nappe: comparison of theoretical models with natural data for elucidation of the formation mechanisms, example of Vorontsovsky overthrust (North-West Caucasus) // Geophysical Research Abstracts, V. 7. 07085. 2007.
- Yakovlev F.* The construction of pre-folding, post-folding and recent stages of quasi-3D model for alpine sedimentary cover of North-West Caucasus basing on the hinterland folding geometry // Slov-Tec 08. Proceedings and Excursion Guide. State Geological Institute of Dionyz Stur Bratislava. 2008. P. 146-148.