

# ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА ПО ДАННЫМ ПОЛЯ СКЛАДЧАТЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

*Ф.Л. Яковлев*

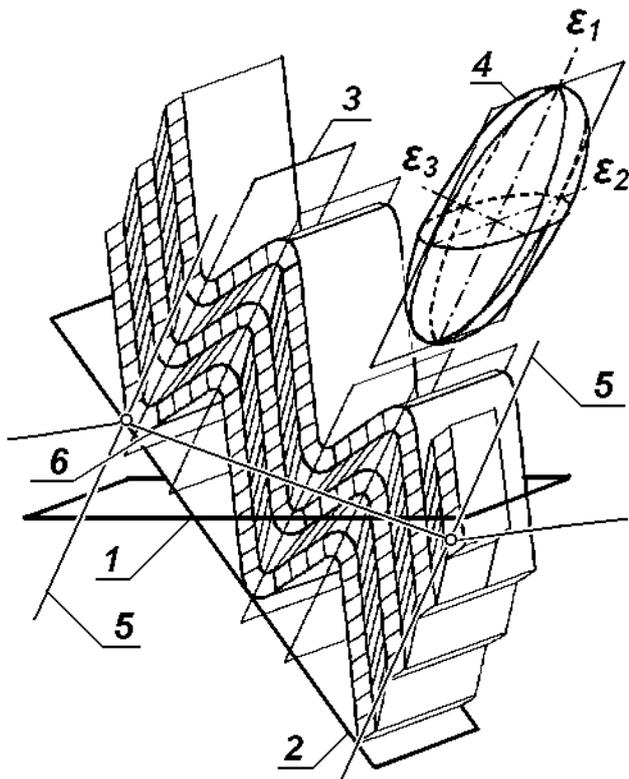
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Геодинамические модели процесса образования складчато-надвигового пояса в их геологической части основаны на геометрической интерпретации структуры, которая наблюдается на поверхности Земли и параметры которой могут быть измерены в поле. Эта информация обычно дополняется материалами бурения и геофизическими данными. Для предгорных частей пояса (форланда) прорисовка современной структуры и восстановление структуры доскладчатой являются достаточно надежными благодаря известным методам балансирования разрезов [Hossack, 1979; Прокопьев и др., 2004]. Однако пока не существует подобных надежных методов для исследования внутренней части складчатого сооружения (хинтерланда), структура которого состоит из многочисленных мелких складок «подобного» морфологического типа. В рамках существующих методов структурной геологии и наиболее распространенной методологии изучения пликативных деформаций на базе континуальной механики, во-первых, нет надежного способа построения структуры дальше чем на 2-3 км за пределы ограниченной по высоте полосы наблюдения, а во-вторых, нет возможности собрать и использовать полную информацию о внутрислойных деформациях в каждой мелкой складке. В то же время именно эти складки потенциально являются источником информации для полного описания деформации этой сложной структуры. Это означает, что наиболее общая реконструкция все-таки может быть получена, но только в случае, если она будет основана на последовательном тектонофизическом изучении процессов образования складчатых структур от малых к крупным структурам [Яковлев, 2007; 2008 а].

**Основы метода реконструкции.** Методологической основой использованного тектонофизического подхода является система семи иерархических уровней линейных складчатых структур [Яковлев, 1997; Ребецкий и др., 2004]. Главным свойством объектов в рамках этой системы является то, что они охватывают именно тот объем слоистости, в котором действуют опеределенные механизмы. Это – 1) внутрислойные

объекты (зерна и деформированные объекты известной формы для стрейн-анализа); 2) отдельные складки (слои); 3) домены (объединения нескольких складок, похожих по наклону осевых поверхностей и по углу схождения крыльев, для некоторого пакета слоев как части осадочного слоя); 4) структурные ячейки (пространство от ядра локального антиклинория до ядра смежного синклинория, охватывающее весь осадочный чехол, в котором объединяются нескольких доменов); 5) тектонические зоны (обычные структуры как совокупности нескольких структурных ячеек, занимающие как минимум часть земной коры как слоя); 6) складчатые системы – существенная часть складчато-надвигового пояса, такая как мегантиклинорий Большого Кавказа, объединяющая несколько тектонических зон; 7) весь складчато-надвиговый пояс, например Альпийский.

Наиболее широко распространенное описание деформаций обычно основано на представлении об эллипсоиде деформаций. На этом строится представление результатов стрейн-анализа для объектов, охватывающих объем образца пород, но при описании деформаций складки и больших по размеру объектов возникают сложности. Используемая нами кинематическая модель образования складок пачки слоев [Яковлев, 2002] позволяет объединить результаты стрейн-анализа и величину сокращения для всей складки. Соответственно, величина сокращения для всей складки является основой для описания деформации в виде эллипсоида деформаций для блока (рис. 1), объединяющего несколько складок (т.е. для домена) [Yakovlev, Voitenko, 2005]. Геометрическими параметрами для каждого домена являются: 1) величина сокращения в направлении перпендикуляра к осевой поверхности, 2) угол наклона осевой плоскости, 3) угол наклона зеркала складок для части структурного пересечения в пределах домена, 4) длина отрезка линии профиля, приходящаяся на домен и 5) наклон этого отрезка. Доскладчатое состояние для объема такого домена может быть восстановлено с использованием трех кинематических операций с этим эллипсоидом (рис. 2). Это – 1) вращение до



**Рис. 1.** Схема представления деформаций в складчатом домене в виде эллипсоида деформаций (по [Yakovlev, Voitenko, 2005] с изменениями). Показаны чередования компетентных и некомпетентных слоев в складках подобного типа

1 – горизонтальная плоскость, 2 – зеркало складок, 3 – осевая плоскость, 4 – эллипсоид деформации: средняя ось  $\epsilon_2$  ( $\epsilon_2 = l_1 l_0 = 1.0$ ) совпадает с шарниром складки, длинная ось  $\epsilon_1$  совпадает с осевой плоскостью и перпендикулярна шарниру ( $\epsilon_1 = l_1 l_0 = 2.13$ ), короткая ось  $\epsilon_3$  ( $\epsilon_3 = l_1 l_0 = 0.47$ ) перпендикулярна шарниру и осевой плоскости (определяется величиной сокращения складки), 5 – границы домена (кружки и наклонные линии, параллельные осевым плоскостям), 6 – отрезок линии профиля для домена

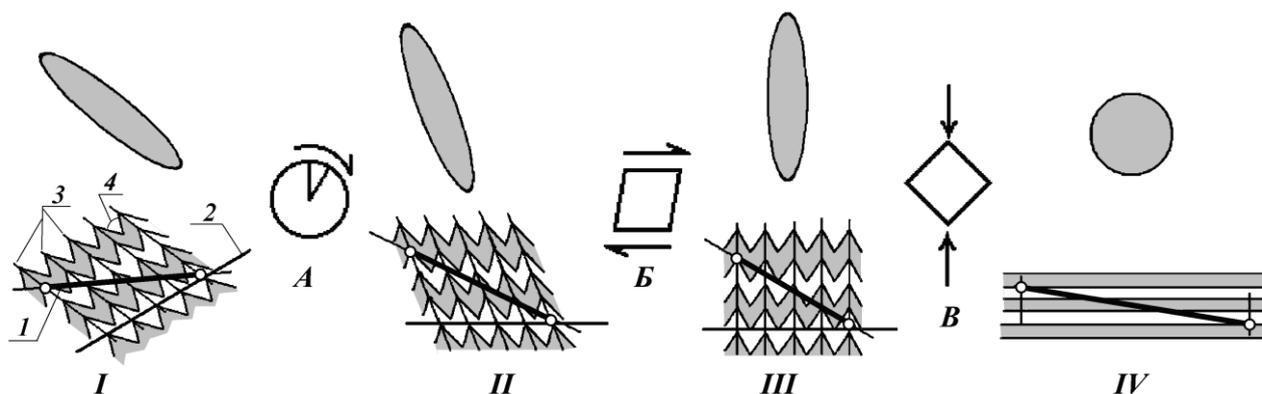
горизонтального положения зеркала складок, 2) горизонтальное простое сдвигание до вертикального положения осевой плоскости, 3) чистый сдвиг в горизонтальном направлении (растяжение) до исчезновения складок (после последней операции эллипсоид становится шаром). Линия разреза в пределах домена меняет свою длину и угол наклона в процессе этих трех операций и имеет определенную позицию внутри горизонтальной слоистости при доскладчатом состоянии домена [Яковлев, 1987, 2002]. Это означает, что домен имеет «стратиграфическую» высоту начальной и конечной точек линии профиля при определенной длине.

Величина горизонтального сокращения пространства для домена легко вычисляется на основании современной и доскладчатой длин вертикальной проекции отрезка линии профиля. Если соседние домены разделяются плоскостью разрыва, то такая плоскость может рассматриваться как часть домена и доскладчатый наклон этой плоскости может быть найден с помощью тех же операций, которые применяются для восстановления домена. Разница в стратиграфических высотах последней точки предыдущего домена и первой точки последующего дает вертикальную амплитуду смещения по разлому. Горизонтальная амплитуда вычисляется из вертикального расстояния и наклона плоскости разрыва. Набор таких доскладчатых состояний доменов и доскладчатых состояний плоскостей разломов является основой для полного восстановления доскладчатой структуры.

Рассмотрим первые результаты применения этой методики для крупной природной структуры.

**Общее описание исследованной природной структуры.** Северо-Западный Кавказ принадлежит к линейным структурам Большого Кавказа в его западной части, и, соответственно, располагается на северо-востоке Альпийского пояса между Скифской плитой и структурами Черного моря. В целом Северо-Западный Кавказ погружается с востока на запад и выходящие на поверхность мезо-кайнозойские стратиграфические подразделения имеют возраст от ранней юры до неогена. Это аргиллит-алевролитовый флиш нижней-средней юры и карбонатный флиш верхней юры – эоцена. Общая мощность этого осадочного чехла составляет около 10-17 км. Терригенные отложения майкопской свиты (олигоцен – нижний миоцен) ложатся с угловым несогласием на нижележащие породы на склонах антиклинория. Это дает основание считать, что основная складчатость имеет преолигоценный возраст. Первые конгломераты появляются в сарматских отложениях (нижний ярус верхнего миоцена), что свидетельствует о начале в это время собственно процессов горообразования.

Многочисленные небольшие по размеру изоклинальные складки средней юры на востоке региона сменяются широкими пологими складками верхнего мела-эоцена в его западной части. Структура северного склона (начиная с меридиана Туапсе на восток, к северу от Главного Кавказского надвига) имеет важную особенность: главная складчатость этого блока прошла



**Рис. 2.** Операции восстановления доскладчатого состояния домена [Яковлев, 2008 б]. Показаны символические изображения складчатой структуры домена (отрезок линии профиля, линия зеркала складок, осевые поверхности складок, угол схождения крыльев соответствует величине сокращения эллипса) для последовательности состояний (от исходного складчатого *I* – к конечному доскладчатому *IV*), эллипсы деформаций, соответствующие тем же состояниям домена, и виды операций (*A* – *B*). Операции: поворот (*A*, от состояния *I* к состоянию *II*), горизонтальный простой сдвиг (*B*, от *II* к *III*), растяжение (чистый сдвиг) (*B*, от *III* к *IV*)

*1* – отрезок линии профиля (измеряются длина и наклон); *2* – линия зеркала складок (измеряется наклон); *3* – осевые поверхности складок (измеряется наклон); *4* – угол схождения крыльев (соответствует величине сокращения складок)

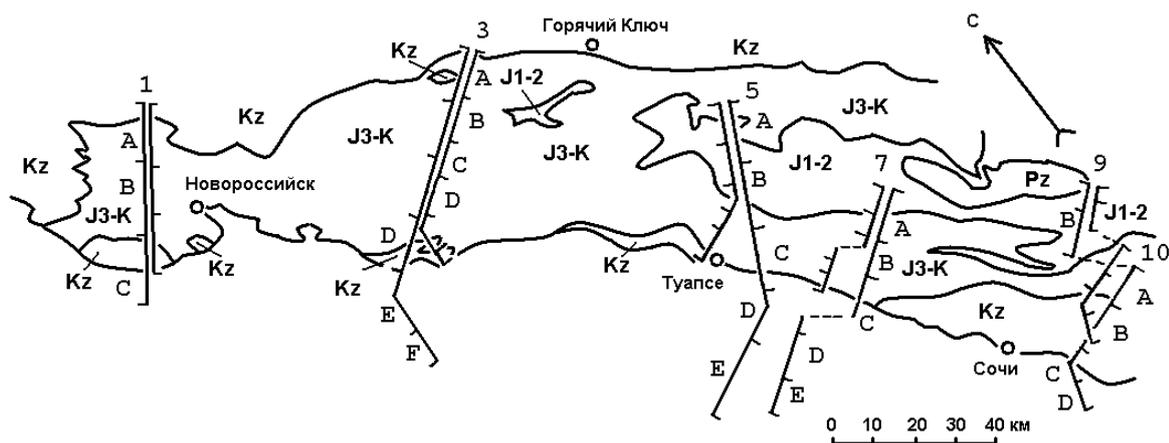
перед поздней юрой. Начиная с этого времени эта структура имела субплатформенный тип тектонического развития с накоплением относительно маломощных (1-2 км) карбонатных пород верхней юры и мела. Структура этого блока в данной работе не рассматривается, поскольку она не охарактеризована структурным материалом. Два восточных пересечения в своих южных частях захватывают субплатформенную Абхазскую зону, основная складчатость в которой также завершилась до поздней юры. Эти части структуры могут рассматриваться как часть Закавказского срединного массива. Подробную информацию о современных взглядах на строение и развитие Большого Кавказа можно найти в [Saintot et al., 2006].

**Сбор материала и его предварительная обработка.** Собственно складчатая структура Северо-Западного Кавказа была хорошо изучена ранее [Гиоргобиани, Закарая, 1989; Шолпо и др., 1993]. Для реконструкции трехмерной модели нами были использованы одиннадцать пересечений, построенных на основании измерений геометрии складок именно в обнажениях (рис. 3). Западные пересечения были составлены Т.В. Гиоргобиани (с № 1, Абрау-Дюрсо до № 4, Джубга). Восточные пересечения (с № 5, Туапсе до № 11, Красная поляна) были составлены Е.А. Рогожиным. Общая длина пересечений составила 347 км в полосе размерами около 250 км на 50 км. Структура всех пересечений была разделена на домены общим числом 244. К сожалению, информация о геометрии слоев в малых складках отсутствует. В связи с этим для

оценки величины сокращения использовался угол между крыльями складок. Все остальные отмеченные выше параметры в каждом домене были также измерены. На этой предварительной стадии обработки было восстановлено доскладчатое положение всех 11 пересечений, и их общая доскладчатая длина, составила 535 км.

Следующая стадия составления 3-мерных моделей состояла в сборе данных о мощностях всех стратиграфических подразделений для разных тектонических зон. Эти мощности существенно отличались и были сведены в таблицу (Excell) как отдельные колонки для каждого домена. «Стратиграфическая высота» для любой границы рассчитывалась как глубина от «0» (подошва майкопской свиты, начало олигоцена) путем суммирования мощностей вышележащих мезо-кайнозойских подразделений. Соответственно, глубина подошвы, например – меловых отложений, составляла от 3050 метров до 9800 метров. Если какая-то информация для домена отсутствовала, этот пробел заполнялся экстраполяцией или интерполяцией мощностей, известных для той же тектонической зоны. Например, мощности подразделений нижней юры для западной части структуры (в которой в качестве самых древних обнажались только эоценовые слои) были взяты из центральных и восточных пересечений. Такая информация позволила скорректировать предварительное восстановление пересечений в части «стратиграфической высоты» и амплитуды разрывов.

Как уже указывалось выше, величину сокращения для каждого домена можно получить после восстановления его доскладчатого



**Рис. 3.** Схематическая карта Северо-Западного Кавказа. Показаны некоторые профили в современной и доскладчатой конфигурации с отрезками, соответствующими структурным ячейкам

положения. Однако существующая значительная дисгармония деформации в пределах чехла не позволяет использовать эти данные в качестве общего тектонического укорочения структуры. Для определения величины сокращения всего осадочного чехла были использованы объемы между ядрами локальных антиклинорий и ядрами смежных синклинорий (т.е. объемы, соответствующие «структурным ячейкам» или четвертому уровню иерархии), которые являются свободными от влияния дисгармонии. Все восстановленные пересечения были разбиты на 42 такие «структурные ячейки». Первоначальная ширина каждой структурной ячейки составляла около 10–17 км, каждый раз почти совпадая с общей мощностью осадочного чехла, а границы ячеек, как правило, совпадали с некоторыми изменениями в стиле тектоники или в уровне стратиграфической глубины линии профиля.

Величины общего сокращения для осадочного чехла были подсчитаны для всех 42-х ячеек как отношение современной длины части профиля к доскладчатой длине той же части пересечения (табл. 1). Так же были получены величины укорочения для профилей в целом. Величина сокращения для исследованных структур для пересечений в целом меняется с небольшими значениями в западной части (0.85, вычисленное как  $L_1/L_0$ ) до 0.5 в центральной части и 0.6–0.7 в восточной. Величины сокращений по ячейкам имеют значительный разброс, от 1.07 (растяжение для ячеек 1А и 2А в северной части западных пересечений) до 0.35 (центральная часть пересечений 5 и 8, ячейки 5D и 8C). Кроме того, вполне определенно наблюдается тенденция усиления сокращения в центральных частях всех профилей, в северных частях восточных

пересечений, примыкающих к Главному Кавказскому надвигу и тенденция более слабого укорочения в южных частях восточных пересечений (ячейки D, E профилей 8 и 10), которые принадлежат уже субплатформенной Абхазской зоне. Для каждой ячейки были также определены координаты ее начальной и конечной точек как современные (для условной километровой сетки), так и доскладчатые на основании длин отрезков пересечений и величин сокращения и в предположении, что простирание линейных складок перпендикулярно к линии пересечения.

На основании собранного материала были построены три модели обобщенного строения осадочного чехла Северо-Западного Кавказа для трех стадий развития: 1) постседиментационная доскладчатая, 2) постскладчатая доорогенная, 3) посторогенная современная.

**Построение постседиментационной доскладчатой модели (стадия 1).** Комбинация доскладчатых координат границ структурных ячеек и собранных данных о доскладчатой мощности стратиграфических подразделений (фиксировались глубины подошвы юрских, меловых и палеогеновых толщ) была достаточна для построения первой трехмерной модели СЗ Кавказа, «постседиментационной, доскладчатой». Эти данные представлены в таблице 1 (столбцы 6–8) и в виде обобщенных пересечений (рис. 4). Для этой и двух следующих стадий (рис. 5) были построены также модели в программной среде ArcView (рис. 6). Надо заметить, что значения глубин горизонтов здесь и для других трехмерных моделей являются результатом вычислений, которые могут быть неточными (полагаем, отклонения могут составить не более 10-15%).

**Таблица 1.** Результаты вычислений длин отрезков профилей для структурных ячеек, величин сокращений и глубин маркирующих горизонтов. Длины и глубины приводятся в километрах

Стадии (столбцы 6-15) →					Доскладчатая			Постскладчатая			Посторогенная			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Профиль ячейка	Число доменов	Доскладчатая длина	Современная длина	Величина сокращения	Подолшва J	Подолшва K	Подолшва P <sub>g</sub>	Подолшва J	Подолшва K	Подолшва P <sub>g</sub>	Подолшва J	Подолшва K	Подолшва P <sub>g</sub>	Поднятие фундамента
1A	6	13.6	14.5	1.07	-17.0	-9.5	-0.9	-15.8	-8.8	-0.8	-13.3	-6.3	1.7	2.6
1B	4	18.8	11.7	0.62	-17.0	-9.5	-0.9	-27.3	-15.2	-1.5	-22.7	-10.6	3.2	4.6
1C	5	17.4	15.4	0.88	-17.0	-9.5	-0.9	-19.3	-10.7	-1.0	-17.1	-8.6	1.1	2.2
<b>3</b>	<b>15</b>	<b>49.8</b>	<b>41.6</b>	<b>0.84</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 1 в целом</i>									
2A	8	13.5	14.9	1.10	-15.2	-7.7	-0.9	-13.8	-7.0	-0.8	-12.4	-5.5	0.6	1.5
2B	5	16.1	11.1	0.69	-16.7	-9.2	-1.2	-23.3	-12.5	-1.3	-18.8	-7.9	3.2	4.5
2C	7	11.2	10.0	0.89	-17.3	-9.8	-1.2	-19.4	-11.0	-1.3	-15.9	-7.5	2.2	3.5
<b>3</b>	<b>20</b>	<b>40.9</b>	<b>36.1</b>	<b>0.88</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 2 в целом</i>									
3A	6	13.1	10.1	0.77	-14.2	-6.7	-1.2	-18.4	-8.7	-1.6	-16.7	-6.9	0.2	1.8
3B	5	13.7	10.7	0.78	-14.7	-7.2	-1.2	-18.8	-9.2	-1.5	-12.6	-3.0	4.7	6.2
3C	6	15.2	9.6	0.63	-17.1	-9.6	-1.2	-27.1	-15.2	-1.9	-16.8	-4.9	8.4	10.3
3D	5	15.1	9.7	0.64	-17.1	-9.6	-1.2	-26.7	-15.0	-1.9	-18.2	-6.5	6.7	8.5
3E	8	15.7	10.8	0.69	-17.1	-9.6	-1.2	-24.8	-13.9	-1.7	-19.0	-8.2	4.0	5.7
3F	4	9.5	4.4	0.47	-17.1	-9.6	-1.2	-36.4	-20.4	-2.6	-31.7	-15.7	2.2	4.7
<b>6</b>	<b>34</b>	<b>82.3</b>	<b>55.3</b>	<b>0.67</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 3 в целом</i>									
4A	10	15.9	15.5	0.98	-13.6	-6.2	-1.4	-13.7	-6.3	-1.4	-11.6	-4.1	0.8	2.2
4B	6	13.7	8.7	0.63	-16.2	-8.8	-1.4	-20.2	-9.9	-1.9	-8.7	1.6	9.7	11.5
4C	10	15.8	11.8	0.75	-16.2	-8.8	-1.4	-21.6	-11.7	-1.8	-12.7	-2.8	7.1	8.9
4D	4	9.7	4.7	0.48	-16.2	-8.8	-1.4	-33.8	-18.3	-2.8	-20.7	-5.3	10.2	13.0
4E	5	16.6	8.0	0.48	-16.3	-8.9	-1.4	-34.0	-18.5	-2.8	-27.3	-11.9	3.9	6.7
<b>5</b>	<b>35</b>	<b>71.7</b>	<b>48.7</b>	<b>0.68</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 4 в целом</i>									
5A	6	14.4	9.7	0.67	-12.8	-4.5	0	-19.1	-6.7	0	-11.2	1.2	8.0	8.0
5B	5	16.3	10.0	0.61	-12.8	-4.5	0	-21.0	-7.4	0	-7.0	6.6	14.0	14.0
5C	3	15.1	5.9	0.39	-12.7	-5.7	-0.4	-32.5	-14.5	-1.0	-14.2	3.7	17.2	18.2
5D	4	13.2	4.4	0.33	-16.1	-8.0	-1.0	-48.8	-24.2	-2.9	-26.6	-2.1	19.3	22.2
5E	5	23.3	9.3	0.40	-16.1	-8.0	-1.0	-40.3	-20.0	-2.4	-29.0	-8.7	8.9	11.3
<b>5</b>	<b>23</b>	<b>82.4</b>	<b>39.4</b>	<b>0.48</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 5 в целом</i>									
6A	5	12.6	6.1	0.49	-12.8	-4.5	0	-26.1	-9.2	0	-9.4	7.5	16.7	16.7
6B	7	14.4	7.1	0.49	-12.3	-4.5	0	-25.1	-9.2	0	-5.7	10.2	19.4	19.4
<b>2</b>	<b>12</b>	<b>27.0</b>	<b>13.2</b>	<b>0.49</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 6 в целом</i>									
7A	7	13.3	7.5	0.56	-8.5	-3.1	0	-15.1	-5.4	0	-4.4	5.3	10.7	10.7
7B	6	8.7	6.3	0.73	-11.5	-4.5	0	-15.8	-6.2	0	-4.6	5.0	11.2	11.2
7C	11	14.6	9.6	0.66	-15.1	-8.0	-1.0	-22.9	-12.1	-1.4	-13.2	-2.5	8.2	9.7
7D	6	12.7	7.0	0.55	-9.8	-6.3	-2.5	-17.8	-11.4	-4.5	-6.9	-0.6	6.3	10.9
7E	3	9.2	4.5	0.49	-9.8	-6.3	-2.5	-19.9	-12.8	-5.1	-7.7	-0.6	7.1	12.2
<b>5</b>	<b>33</b>	<b>58.4</b>	<b>34.9</b>	<b>0.60</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 7 в целом</i>									
8A	6	10.5	5.6	0.54	-9.1	-4.5	0	-16.9	-8.4	0	-3.6	4.9	13.3	13.3
8B	7	11.4	7.5	0.66	-16.1	-8.0	-1.0	-24.4	-12.1	-1.4	-12.4	-0.2	10.5	11.9
8C	4	12.7	4.6	0.36	-16.1	-8.0	-1.0	-44.7	-22.2	-2.6	-25.1	-2.6	17.0	19.6
8D	6	12.7	9.8	0.77	-10.8	-6.3	-2.5	-14.0	-8.2	-3.3	-7.9	-2.1	2.8	6.0
8E	4	8.3	7.0	0.84	-10.8	-6.3	-2.5	-12.8	-7.5	-3.0	-10.0	-4.6	-0.1	3.4
<b>5</b>	<b>27</b>	<b>55.6</b>	<b>34.5</b>	<b>0.62</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 8 в целом</i>									
9A	5	6.6	3.2	0.49	-8.8	-3.3	-0.2	-17.9	-6.6	-0.4	-5.6	5.7	11.9	12.3
9B	8	11.5	7.9	0.69	-8.8	-3.1	0	-12.4	-4.4	0	-2.2	5.7	10.2	10.2
<b>2</b>	<b>13</b>	<b>18.1</b>	<b>11.1</b>	<b>0.61</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 9 в целом</i>									
10A	5	10.1	3.7	0.37	-9.8	-6.3	-2.5	-26.4	-17.0	-6.8	-15.2	-5.8	4.4	11.1
10B	5	6.7	4.4	0.65	-10.8	-6.3	-2.5	-16.5	-9.7	-3.8	-8.3	-1.5	4.4	8.2
10C	5	6.9	5.5	0.80	-10.8	-6.3	-2.5	-13.4	-7.9	-3.1	-6.9	-1.3	3.4	6.5
10D	6	8.9	7.3	0.82	-7.6	-3.6	-1.8	-9.1	-4.4	-2.1	-9.1	-4.4	-2.1	0
10E	5	7.6	6.3	0.83	-7.3	-3.3	-1.5	-8.7	-4.0	-1.7	-8.6	-3.9	-1.7	0
<b>5</b>	<b>26</b>	<b>40.1</b>	<b>27.2</b>	<b>0.68</b>	<i>Столбцы 1-5 слева: параметры для пересечения 10 в целом</i>									
11A	6	8.3	4.9	0.59	-8.8	-3.3	-0.2	-14.8	-5.5	-0.3	-5.4	3.8	9.1	9.6

Соответственно, строго говоря, во внимание должны приниматься только округленные значения глубин и общие тенденции. Так, для подошвы юрских отложений для этой стадии характерны глубины 10-17 км с тенденцией к уменьшению в северной части и наибольшим прогибанием в южной части района для западных пересечений и в центральной – для восточных. Вдоль простирания в целом наблюдается уменьшение глубин к востоку.

**Построение постскладчатой доорогенной модели (стадия 2).** После соскладчатого преолигоценного сокращения пространства каждое стратиграфическое подразделение приобрело новые вертикальные мощности, которые были рассчитаны на основании величин сокращения в структурных ячейках, исходя из следующих предположений:

1) объем осадочного чехла сохраняется постоянным;

2) деформация вдоль простирания СЗ Кавказа отсутствует.

Для каждого подразделения в каждой структурной ячейке новые мощности были преобразованы в глубины в предположении, что кровля палеоцена совпадала с «0» (уровнем моря). Это было сделано для конструирования постскладчатой доорогенной модели как предельно простой, поскольку:

1) собственно рост гор имел место явно существенно позже олигоцена;

2) можно предполагать, что структура не подвергалась интенсивной эрозии до сарматского времени.

Результаты вычислений представлены в таблице 1 (столбцы 9 – 11) и на рис. 5, А.

Для поверхности подошвы юрских отложений на этой стадии характерно прогибание в центральной и южной частях западных пересечений и в центральной части восточных. Максимальных величин этот параметр достигает в ячейках 5D (-48.8 км) и 8С (-44.7 км).

**Построение посторогенной модели (современная структура, стадия 3).** Поскольку для каждого отрезка линии профиля в доменах есть точные величины его современного гипсометрического положения и величины «стратиграфической глубины» (как первоначальной, так и постскладчатой), то на основании этих данных существует возможность определить среднюю для структурной ячейки величину поднятия, при которой для каждого домена именно данное стратиграфическое подразделение должно выходить на дневную поверхность. Вводя эту «поп-

равку за поднятие», легко найти современные глубины (высоты) для тех же стратиграфических реперов (подошвы юрских, меловых и палеогеновых толщ). Вычисленные данные о соответствующих глубинах (высотах) представлены в таблице 1 (столбцы 12-14) и на рис. 5, Б. Как и для предыдущей стадии, максимальные глубины подошва чехла занимает в ячейках со значительным укорочением (3F – 0.47; 5D – 0.33; 5E – 0.40; 8С – 0.36) и достигают величин -31.6 км, -26.6 км, -29.0 км, -25.1 км.

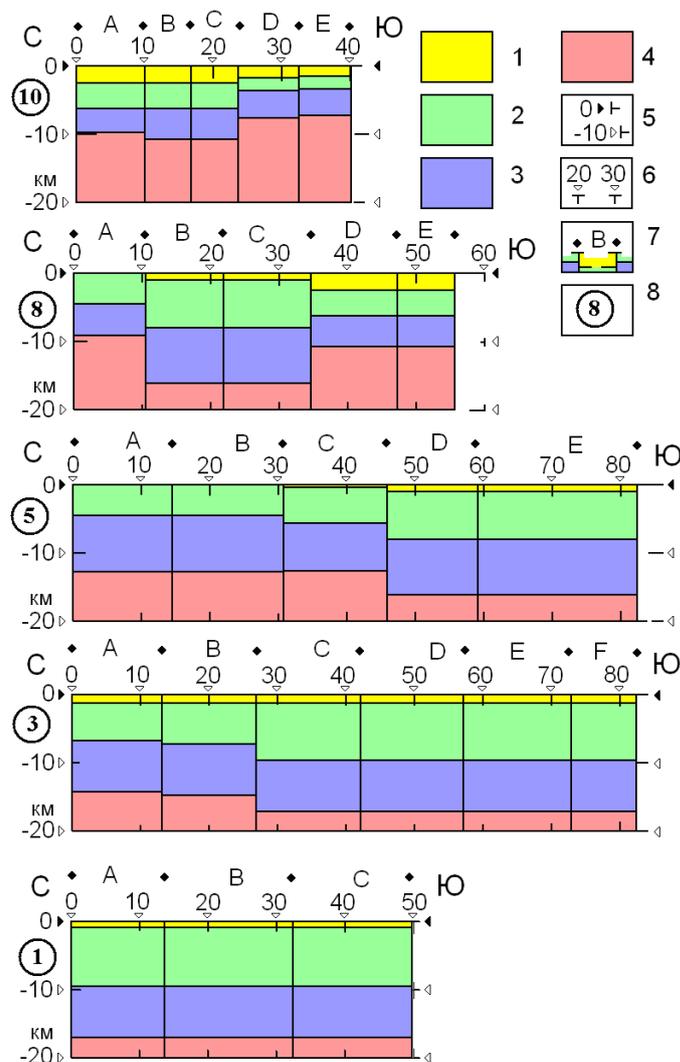
Современный рельеф поверхности чехлофундамент, таким образом, имеет центральный прогиб до глубин 18–20 км в самой западной части (профили 1 и 2), резкий наклон к югу в центральной (глубины от 7–10 км на севере до 28–31 км на юге, профили 3-5) и центральный прогиб на востоке (до глубин 13–25 км, профили 7, 8, 10). Поднятие в среднем по Северо-Западному Кавказу (таблица 1, столбец 15) составило 8.5–9.0 км увеличиваясь с 1–3 км в западных пересечениях до 10–15 км в центральных и восточных. Для некоторых ячеек, как правило – имеющих значительное сокращение, величина поднятия составляла 18–22 км.

Разумеется, все эти величины ни в коем случае не следует рассматривать как бывшую максимальную высоту рельефа. Прежде всего они характеризуют объем размытых пород (или перемещенных в соседние ячейки вследствие гравитационного оползания крупных пластин).

**Обсуждение результатов.** Надо отметить, что для пересечения 5 существует геофизический разрез [Шемпелев и др., 2001], в котором глубина подошвы осадочного чехла имеет погружение с севера на юг от 5 до 25 км. Как это видно из рис. 5, примерно такая же конфигурация этой границы была получена при наших расчетах. В то же время для существующих моделей строения осадочного чехла, использующих схему А-субдукции [Дотдугев, 1986; Robinson et al., 1996] характерна глубина кровли фундамента не более 5 – 10 км. Как было показано расчетами, такие значения не могут существовать, если принимать во внимание исходные мощности осадков, постоянство объема осадков при деформациях и величины деформаций.

Это означает, что модели строения осадочного чехла Большого Кавказа, опирающиеся на схемы А-субдукции, следует признать несбалансированными и ошибочными.

Полученная модель строения осадочного чехла подтвердила сделанный ранее вывод [Яковлев, 2006], что структура коллизионной зоны может представлять собой крупномасштаб-



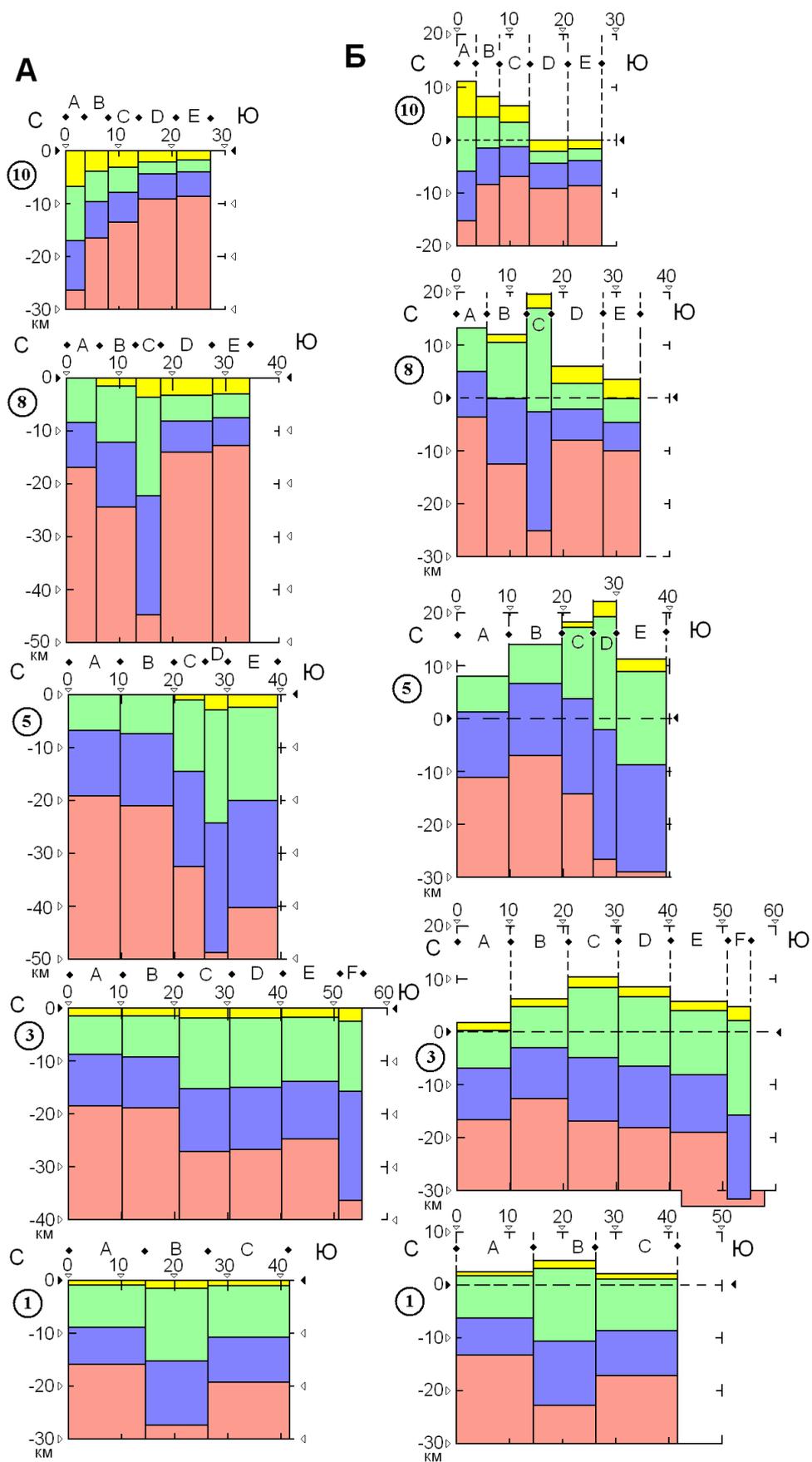
**Рис. 4.** Профили для доскладчатой стадии развития (выборочно). Показаны расстояния и глубины в километрах, границы ячеек (ромбы) и позиции подошвы отложений палеогена, мела и юры. Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковы. Расстояния и глубины соответствуют расчетным (таблица 1).

1 – отложения палеогена и эоцена, 2 – меловые отложения, 3 – юрские отложения, 4 – фундамент, 5 – отметки глубин, 6 – отметки горизонтальных расстояний, 7 – границы и индексы структурных ячеек, 8 – номера пересечений

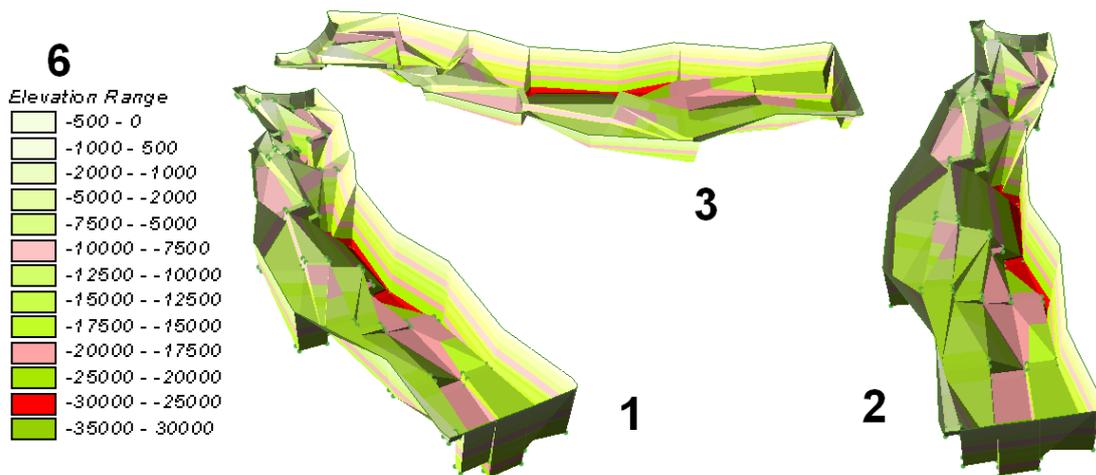
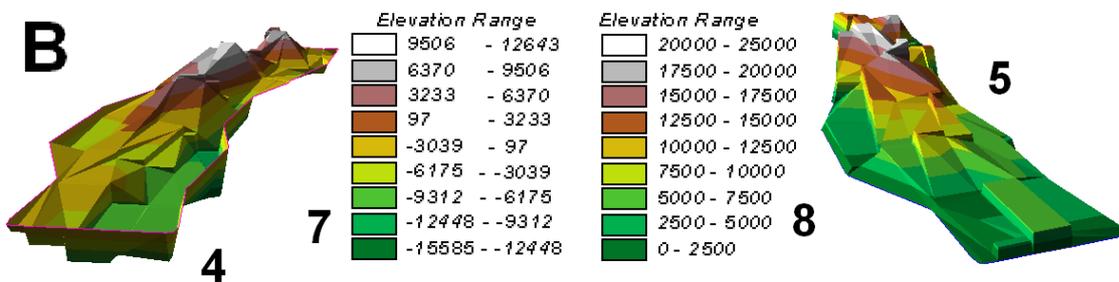
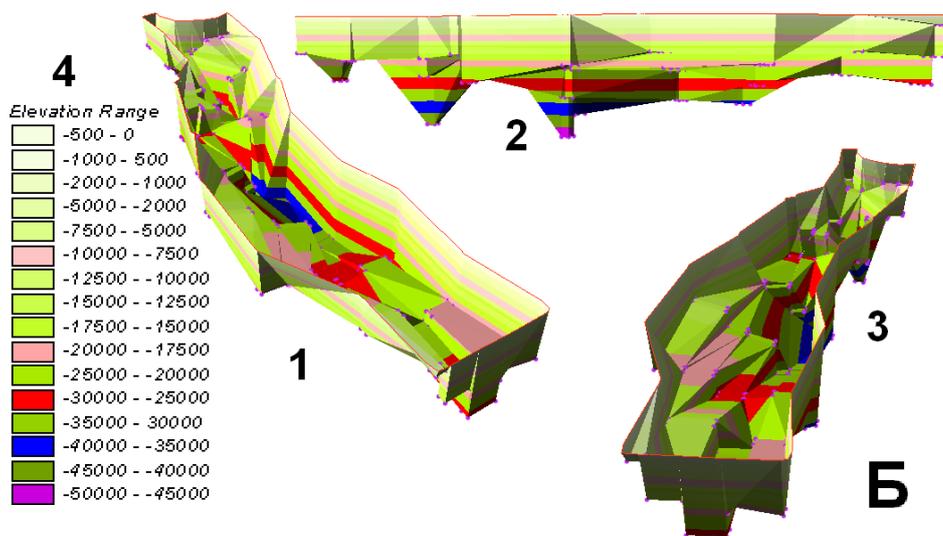
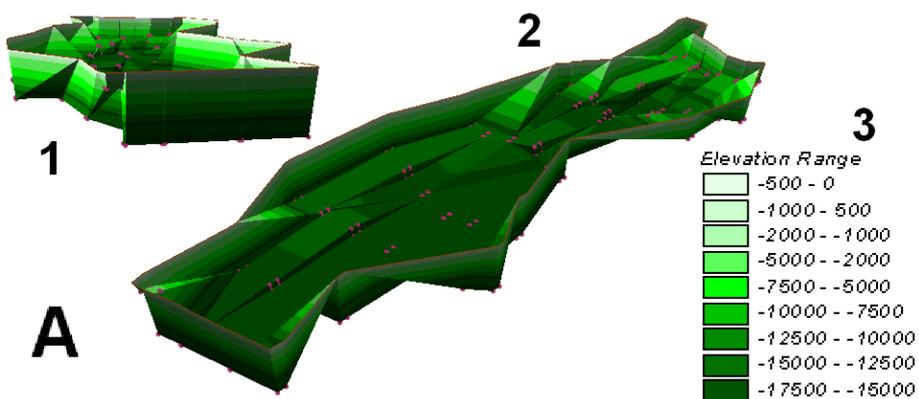
ное погружение фундамента Большого Кавказа, исключаящее региональное пододвигание (рис. 7, а также ячейки 8С и 8D, рис. 4, 5). Логика построения следующая. В пределах хинтерланда (рис. 7) накапливается значительная мощность осадков, что обеспечивается погружением фундамента по сбросу на границе срединного массива и хинтерланда (стадия 1). После формирования складчатости и соответствующего горизонтального укорочения (стадия 2) общая мощность толщи в пределах хинтерланда увеличивается (в данном случае – вдвое).

Увеличение мощности может быть обеспечено только увеличением амплитуды сброса в процессе укорочения, причем в общем случае

амплитуда погружения более глубоких частей будет нарастать (обратите внимание на смещения маркирующих слоев: а-а, b-b, с-с, d-d, e-e). На рис. 7 показаны два случая – а) отсутствие вертикального смещения на поверхности (2А, маркер а-а не смещается) и б) образование локального надвига в верхней части структуры при погружении части форланда (2Б). В последнем случае смещение отсутствует ниже, на уровне маркера b-b. Стандартная ошибка исследователей заключается в том, что такой локальный надвиг принимается за общую региональную структуру, и тогда говорится о пододвигании срединного массива под складчатые структуры как о причине возникновения всей складчатости.



**Рис. 5.** А (левая колонка) – профили для посткладчатой, доорогенной стадии развития (выборочно). Б (правая колонка) – профили для посторогенной, современной стадии. Показаны расстояния и глубины в километрах, границы ячеек (ромбы) и позиции подошвы отложений палеогена, мела и юры. Условные знаки см. на рис. 4. Расстояния и глубины (высоты) соответствуют расчетным (таблица 1)



**Рис. 6.** Трехмерные модели реперных поверхностей осадочного чехла, построенные в среде ArcView (аксонометрия). Стадии: доскладчатая (А), постскладчатая (Б), современная (В)

**А** – доскладчатая модель, характеризуется в целом плоским дном осадочного бассейна, показана поверхность подошвы юрских отложений. Тени показаны для освещения структуры с севера. Вертикальные стенки моделей и угловатый рельеф здесь и далее (рисунки Б и В) не имеют отношения к реальной природной структуре и являются следствием технических особенностей визуализации рельефа

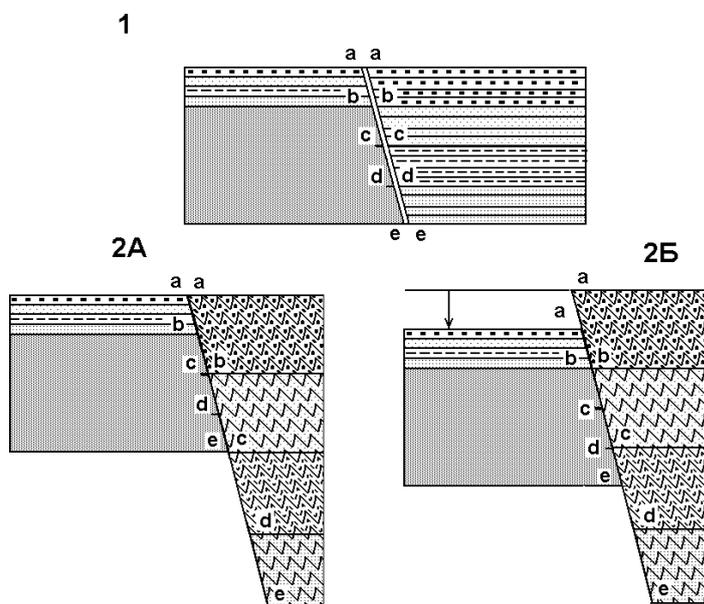
**1** – обзор структуры так, как если бы наблюдатель находился к запад – северо-западу от структуры и угол наблюдения для него составлял бы 15°, **2** – обзор с юго-запада, угол 45°, **3** – глубины и градации цвета для этих моделей

**Б** – постскладчатая модель, характеризуется прогибанием в оси структуры в ее западной и восточной частях, а также глубоким погружением южного края в центре, показана поверхность подошвы юрских отложений.

**1** – обзор с северо-запада, угол 45°, **2** – обзор с севера, угол 0°, **3** – обзор с запада, угол 45°, **4** – глубины и градации цвета для этих моделей

**В** – современная посторогенная модель, характеризуется прогибанием в оси структуры в ее западной и восточной частях, а также глубоким погружением южного края в центре, показаны поверхность подошвы юрских отложений (1-3), подошвы мела (4) и подошвы палеогена (5)

**1** – обзор с северо-запада, угол 45°, **2** – обзор с запада, угол 45°, **3** – обзор с севера, угол 45°, **4** – обзор с запад – юго-запада, угол 30°, **5** – обзор с северо-запада, угол 30°, **6** – глубины и градации цвета для моделей 1-3, **7** – то же для 4, **8** – то же для 5



**Рис. 7.** Принципиальная схема строения зоны перехода от структур межгорного массива (левая часть) к зоне линейной складчатости (к хинтерланду, правая часть). Показаны реперы: а-а, b-b, с-с, d-d, e-e и их смещение после деформации (по [Яковлев, 2008 б]). 1 – структура после накопления осадков, до возникновения складок; 2 – структура после возникновения складок, вариант 2А – без погружения стабильного блока, вариант 2Б – с его погружением

**Заключение.** Разработаны и реализованы основные принципы построения трехмерной модели внутренних частей складчатых сооружений. Получены трехмерные модели глубин подошвы основных стратиграфических подразделений для трех стадий развития структуры осадочного чехла Северо-Западного Кавказа – доскладчатой, постскладчатой (доорогенной) и орогенной (современной). Получены амплитуды орогенного

поднятия кровли фундамента с конца постскладчатой стадии. Полученные значительные глубины кровли фундамента согласуются с современными геофизическими материалами. Выявлена ошибочность общепринятых схем строения и развития Большого Кавказа, основанных на представлении о пододвигании под него блоков Закавказского массива как основной причине тектогенеза.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. Тбилиси: Мецниереба. 1989. 61 с.
- Дотдуге С.И. О покровном строении Большого Кавказа // Геотектоника. 1986. № 5. С. 94–106.
- Проконьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы: (Морфология, геометрия и кинематика). Учеб. Пособие. Якутск: ЯФ Изд. СО РАН. 2004. 148 с.
- Ребецкий, Ю.Л., Михайлова А.В., Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л. Тектонофизика // Планета Земля.

- Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика». Под ред. Л.И. Красный, О.В. Петров, Б.А. Блюман. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ. 2004. (652 с.) С. 121–134.
- 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., 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 кинематики линейной складчатости (на примере Юго-Восточного Кавказа) // Геотектоника. 1987. № 4. С. 31–48.
- 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.* О построении рельефа поверхности раздела чехол-фундамент Большого Кавказа на основе определения величин сокращения складчатых структур // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли. Материалы XXXIX тектонического совещания. Т. II. М.: ГЕОС. 2006. С. 411–415.
- Яковлев Ф.Л.* Первый опыт построения трехмерной модели структуры области линейной складчатости на основе количественных параметров деформации (на примере Северо-Западного Кавказа) // Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2007. С. 392–396.
- Яковлев Ф.Л.* Многограновый деформационный анализ структур линейной складчатости // Доклады Академии Наук. 2008 а. Т. 422, № 3. С. 371–376.
- Яковлев Ф.Л.* Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости // Геофизические Исследования. 2008 б. Т. 9, № 1. С.56-75.
- Hossack J.R.* The use of balanced sections in the calculation of orogenic contraction – a review // J. Geol. Soc. London: 1979. V. 136. P. 705–711.
- 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.
- Saintot A., Brunet M.-F., Yakovlev F., Se'Brier M., Stephenson R., Ershov A., Chalot-Prat F. & Mccann T.* The Mesozoic–Cenozoic Tectonic Evolution Of The Greater Caucasus // Gee, D. G. & Stephenson, R. A. (eds) European Lithosphere Dynamics. Geological Society of London. Memoirs. 2006. V. 32. P. 277–289.
- 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.