СБАЛАНСИРОВАННАЯ СТРУКТУРА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АЛЬПИЙСКОГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА БОЛЬШОГО КАВКАЗА ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ В ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ

Ф.Л. Яковлев

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

Проблема механизма складкообразования – одна из самых сложных в тектонике, она существует уже более двух веков. Ее актуальность связана с тем, что от ее решения зависит правильное понимание сути процессов, формирующих консолидированную часть земной коры и большую часть полезных ископаемых. Главный аспект проблемы – нерешенность вопроса о дорисовке известной на поверхности структуры на большую глубину. Решать его предлагается на основании величин деформации в мелких структурах и с учетом сохранения объемов осадочной толщи [8, 9].

Были проанализированы детальные данные о складчатых и разрывных структурах осадочного чехла Большого Кавказа по трем тектоническим зонам, которые расположены восточнее блока Центрального Кавказа (рис. 1). С юга на север использованы: пересечение 11 длиной 30 км в Чиаурской зоне [6, 7], 8 профилей в Тфанской зоне [3, 5] (от 1 до 8, ширина зоны 12 км) и Шахдагская зона (два профиля, 9 и 10 там же, но севернее, ширина зоны 20 км). Общая длина этих профилей составила 125 км. Структура указанных трех зон образует полное пересечение через области наиболее интенсивной линейной складчатости в осадочном чехле Большого Кавказа.

Смятые в складки породы осадочного чехла Большого Кавказа имеют возраст от ранней юры до начала олигоцена. Терригенная нижняя юра начинается с конгломератов; выше по разрезу породы очень быстро приобретают глубоководный характер (сланцы и флишоидное чередование сланцев и песчаников). На рубеже средней и поздней юры режим осадконакопления меняется, при этом в зонах Шахдагской, Окрибо-Сачхерской, Гагро-Джавской формируется складчатость с последующим размывом. В указанных зонах после этого накапливаются мелководные параплатформенные относительно маломощные толщи карбонатных пород. В пространстве между ними – в Тфанской и Чиаурской зонах – в это время без существенных перерывов начинается накопление мощных карбонатных флишевых толщ верхней юры, мела и низов палеогена. Общая мощность чехла Чиаурской, Тфанской и Шахдагской зон составляет от 8-9 км до 16-17 км. Считается, что перед олигоценом возникла основная складчатость [2], а после сармата началось основное сводово-глыбовое воздымание горного сооружения. В соответствии с этим мнением и для целей расчетов сбалансированной модели была принята трехстадийная схема развития региона: 1 стадия – завершение осадконакопления (конец эоцена), 2 стадия – полное формирование складчатости (начало олигоцена, без синхронного размыва кровли чехла), 3 стадия – современная посторогенная.

Методика построения пересечений в поле [5] включает детальные зарисовки структуры с полным замером всех основных ориентировок слоистости в складках, наклона их осевых поверхностей и наклона плоскостей разрывов. Возраст пород определялся по детальным геологическим картам. Конечным материалом полевых исследований являлись пересечения 1:10 000 масштаба, наиболее полно соответствующие природе. Профиль через Чиаурскую зону, составленный по замерам структуры в поле и по детальным геологическим картам, имеет исходный масштаб 1:25 000.

В качестве основного подхода в решении задачи определения величины укорочения использовались многоранговый деформационный анализ и система иерархии структур линейной складчатости [7, 8]. Из набора семи иерархических уровней в данной работе использовались четыре – складки, складчатые домены, структурные ячейки, тектонические зоны. Реконструкция крупных структур – тектонических зон и всего Большого Кавказа – производилась на основании данных о деформациях более мелких структур; в этой связи полученный результат изначально не мог быть связан с какими-либо геодинамическими моделями или геотектоническими теориями.

Для восстановления структуры использовался метод построения сбалансированных доменов по геометрии складчатых доменов [8]. На структурных профилях выделялись домены, которые считались однородными структурами (рис. 1, *б*). Деформация складчатой толщи в пределах домена описывалась эллипсоидом деформаций. Его параметры отождествлялись с измеряемыми в доменах параметрами: наклонами осевых поверхностей складок (наклон длинной оси эллипсоида), наклоном зеркала складок (ориентировка исходной слоистости), углами схождения крыльев складок (величина

укорочения его короткой оси). Дополнительно в домене измеряется длина отрезка линии профиля и его наклон к горизонту. Всего в 11 профилях было выделено 220 складчатых доменов. Основная операция восстановления доскладчатого положения домена состоит из трех геометрических этапов: поворот домена до горизонтального положения зеркала складок, простой сдвиг в горизонтальном направлении до вертикального положения осевой плоскости, горизонтальное растяжение (чистый сдвиг). При этих операциях эллипс становится кругом, вписанным в среду с горизонтальной слоистостью, а отрезок линии профиля приобретает другую длину и другой наклон. Объединение соседних доменов создает общую доскладчатую структуру всего профиля. Составленные таким образом сбалансированные пересечения имели общую доскладчатую длину 270 км.

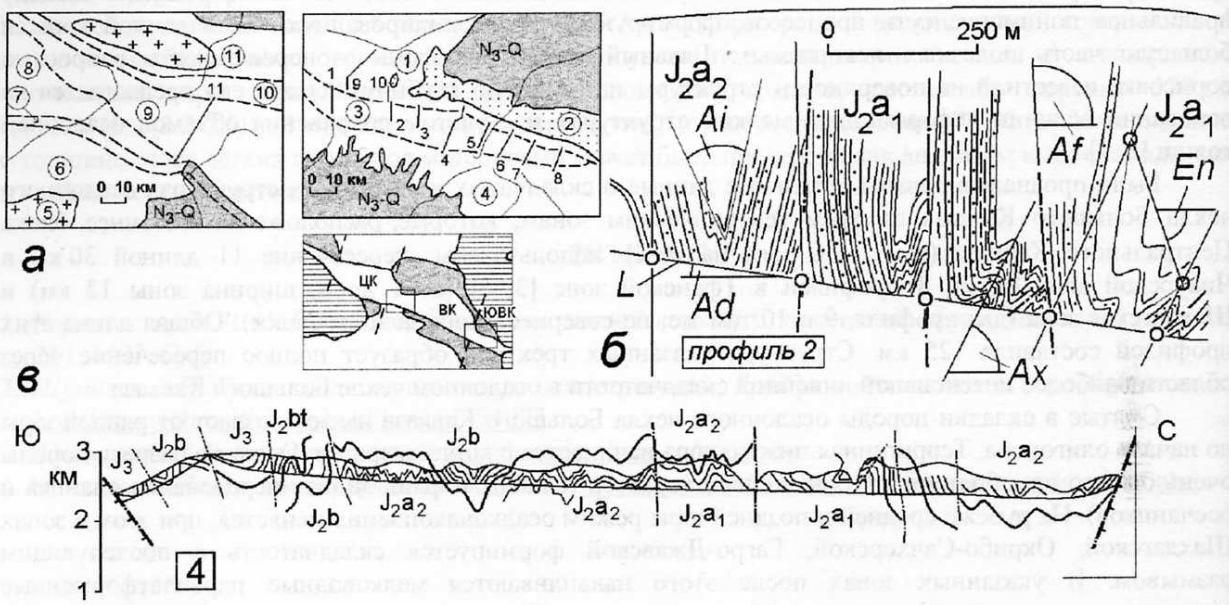

Рис. 1. Структурный материал, лежащий в основе исследования восточной части Большого Кавказа [9]. (*а*) – структурные схемы и расположение профилей (цифры в кружках: 1 – Шахдагская зона, 2 – ее параплатформенный чехол J_3-K_2, 3 – Тфанская зона, 4 – Ковдагская зона, 5 и 6 – Закавказский массив (5 – Дзирулькая и 6 – Окрибо-Сачхерская зоны), 7 – зона Рача-Лечхумского разлома, 8 – Гагра-Джавская зона, 9 – Чиаурская зона, 10 – Даличай-Мазинская зона, 11 – Дигоро-Осетинская зона; другие цифры – номера профилей; (*б*) – часть детального профиля с замерами параметров в четырех доменах: (*L, Ad*) – длина и наклон отрезка профиля в домене, (*Ax*) –наклон осевых поверхностей складок, (*En*) – наклон зеркала складок, (*Ai*) – величина укорочения (по углу между крыльями складок), (*Af*) – наклон плоскости разрыва; (*в*) – структурный профиль 4 (Тфанская зона)

По литературным данным о мощностях основных стратиграфических единиц, а также по материалам замеров мощностей подразделений в конкретных профилях на крыльях складок, составлялись «стратиграфические модели» пересечений для всего чехла. Мощность чехла в моделях составляла от 10 до 17 км, средняя мощность – 13 км. Для определения величин тектонического укорочения на доскладчатых пересечениях выделялись «структурные ячейки», ширина которых (длина вдоль доскладчатого профиля) была сопоставима с мощностью осадочного чехла. Для Чиаурской зоны были выделены 5 ячеек, для Тфанской – в основном по 2 ячейки на профиль, для Шахдагской – 3 ячейки. Для этих 28 структурных ячеек по отношению современной и доскладчатой их ширины определялась величина укорочения , которая составила от 37 до 67%, 54% в среднем (табл., колонки 1, 2, 3). В таблице показаны также глубина подошвы осадочного чехла для доскладчатой стадии (колонка 4). В соответствии с величиной укорочения определялась новая «глубина» подошвы для стадии 2 (колонка 5), а также, с учетом высоты линии профиля от уровня моря и новой «глубиной» пород, попадающих на эту линию, находилась глубина (высота) границ основных стратиграфических единиц для современной стадии (колонки 6 и 7). Так же определялась «высота» постскладчатой колонны осадков, которые были размыты при образовании рельефа.

Полученные данные позволили построить отдельные профили в виде ячеек с охватом всего садочного слоя для всех трех стадий (рис. 2) и квази-трёхмерную модель Тфанской и Шахдагской зон [9]. По этим данным были описаны закономерные структуры в рельефе кровли фундамента, глубина которого составила от 4 до 24 км (в среднем – 13 км). Были выделены: устойчивый уступ в фундаменте восточной части Тфанской зоны с амплитудой до 10 км (профили 4-8), уступ 8.4 км в

Чиаурской зоне (ячейки 11ц и 11с1) и сброс 10-15 км по кровле фундамента между Чиаурской зоной и Закавказским массивом. Характерен одинаковый для трех ячеек уровень фундамента в Шахдагской зоне; его глубина в соседней Тфанской зоне сохраняется (профили 9, 10 и 2). Размытая мощность колонны осадков выше современного рельефа составила от 7 до 24 км (в среднем – 16 км).

Таблица. Основные результаты построения сбалансированной модели осадочного чехла по ячейкам [9]. Показана доскладчатая и современная ширина структуры (в км, колонки 1, 2), величина укорочения (колонка 3), глубина подошвы осадочного чехла для трех стадий развития (в км, колонки 4, 5, 6), и «высота» кровли размытой части чехла (колонка 7)

Яч.	*L0*	*L1*	*Sh*	*1 J1*	*2 J1*	*3 J1*	*Elev*
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1 с	8.1	3.9	51%	-11.9	-24.8	-10.3	14.5
1 ц	8.2	2.8	67%	-11.9	-36.1	-17.4	18.7
1 ю	5.6	3.1	44%	-11.9	-21.3	-9.7	11.6
2 с	11.9	4.0	66%	-11.9	-34.9	-13.0	21.9
2 ю	8.0	2.8	65%	-11.9	-33.9	-12.3	21.6
3 с	9. 3	3.5	62%	-11.9	-31.3	-10.9	20.4
3 ю	9.0	3.5	61%	-11.9	-30.5	-11.2	19.3
4 с	7.8	4.7	40%	-11.9	-19.8	-7.6	12.2
4 ц	7.9	3.3	58%	-16.7	-39.6	-15.2	24.4
4 ю	7. 8	3.2	59%	-16.7	-40.6	-17.7	22.9
5 с	9.9	5.0	49%	-11.9	-23.3	-9.0	14.3
5 ю	11.2	4.3	61%	-16.7	-42.7	-19.4	23.3
6 с	7.9	5.1	36%	-15.5	-24.2	-8.7	15.5
6 ю	14.7	5.5	62%	-15.5	-40.8	-18.2	22.6

Яч.	L_0	L_1	*Sh*	$1\ J_1$	$2\ J_1$	$3\ J_1$	*Elev*
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
7 с	11.6	6.2	47%	-13.5	-25.4	-6.6	18.8
7 ю	11.2	4.8	57%	-13.5	-31.3	-10.8	20.5
8 с	5.1	2.6	48%	-12.8	-24.5	-4.4	20.1
8 ю	8.3	2.9	65%	-12.8	-36.4	-13.6	22.3
9 с	14.7	9.2	38%	-9.8	-15.8	-8.6	7.2
9 ц	10.2	5.2	49%	-9.8	-18.8	-7.8	11.0
9 ю	8.3	5.3	37%	-9.8	-15.6	-7.6	7.9
10 с	8.5	3.6	58%	-9.8	-23.3	-13.7	9.6
10 ю	8.0	3.1	62%	-9.8	-25.8	-13.3	12.5
11 с2	9.3	4.7	49%	-15.3	-30.0	-13.7	16.3
11 с1	10.9	5.6	48%	-15.3	-29.4	-16.2	13.3
11 ц	14.3	5.9	59%	-15.3	-37.3	-24.6	12.5
11 ю2	10.5	4.4	58%	-15.3	-36.4	-22.4	14.0
11 ю1	12.1	6.5	46%	-15.3	28.3	-18.6	9.7

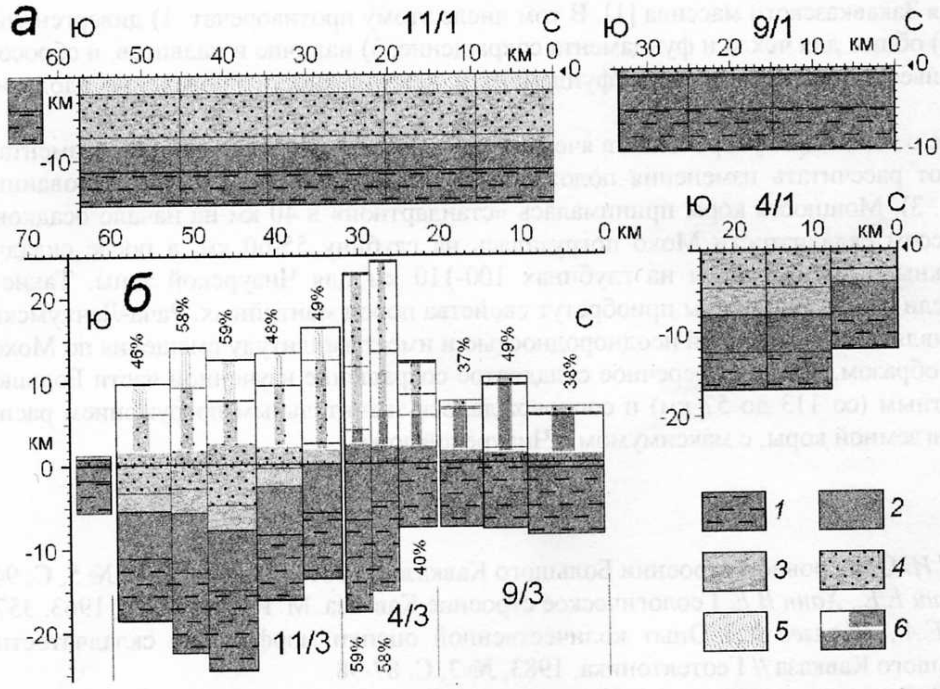

Рис. 2. Восстановленные структуры основных тектонических зон Большого Кавказа по стадиям развития (по [9], с изменениями). (а) – стадия развития структуры доскладчатая, конец эоцена: профили 11/1; 4/1, 9/1; (б) – общая схема современного строения альпийского чехла, стадия 3 (современная, посторогенная): профили 11/3, 4/3; 9/3, показаны величины укорочения для ячеек в процентах. Для профиля 11 с юга показана для сравнения часть структуры Закавказского массива.

1 – отложения нижней юры, 2 – отложения средней юры, 3 – отложения верхней юры, 4 – отложения мела, 5 – отложения палеогена, 6 – положение поверхности рельефа (колонка пород, показанная выше, размыта)

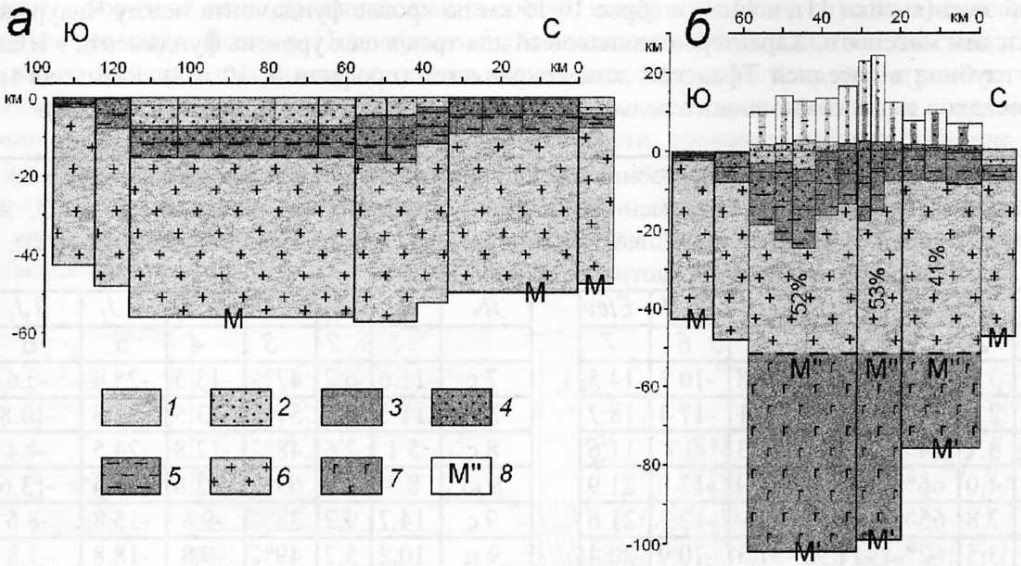

Рис. 3. Принципиальная гипотетическая схема глубинного строения сооружения Большого Кавказа [9]: в конце этапа осадконакопления перед основной складчатостью (а) и на современном этапе после укорочения и горообразования (б): 1 – палеоцен и эоцен, 2 – мел, 3 – верхняя юра, 4 – средняя юра, 5 – нижняя юра, 6 – объемы кристаллической части земной коры до поверхности Мохо (на начало осадконакопления), 7 – предполагаемые объемы мантийного вещества, образованные из погруженной части земной коры, 8 – граница Мохо: М – граница Мохо из расчета 40 км мощности коры на начало юры, М' – современное положение пород, занимавших первоначально (на (а)) позицию границы Мохо, М" – предполагаемое положение границы Мохо (новообразованной)

Указанные данные вместе с полученными ранее результатами [10] позволяют сделать вывод о полной невозможности использования для объяснения складчатости Большого Кавказа схемы пододвигания Закавказского массива [1]. В том числе этому противоречат: 1) дивергентный характер структуры, 2) общее для чехла и фундамента сокращение, 3) наличие и надвигов, и сбросов, 4) резкие перепады рельефа поверхности чехол/фундамент и невозможность проведения вдоль нее единого детачмента.

Данные о величинах укорочения в ячейках и о совместном укорочении фундамента и чехла [4, 10] позволяют рассчитать изменения положения границы Мохо [9] при формировании Большого Кавказа (рис. 3). Мощность коры принималась «стандартной» в 40 км на начало осадконакопления, перед процессом складчатости Мохо погрузилась на глубину 55-60 км, а после складчатости эти породы должны были оказаться на глубинах 100-110 км для Чиаурской зоны. Такие изменения возможны, если часть пород коры приобретут свойства пород мантийных. Рача-Лечхумский разлом в этом случае является крупнейшей неоднородностью и имеет амплитуду смещения по Мохо до 50 км.

Таким образом, общее поперечное складчатое сокращение изученной части Большого Кавказа было двукратным (со 113 до 57 км) и сопровождалось значительным погружением расположенных ниже объемов земной коры, с максимумом в Чиаурской зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дотдуев С.И.* О покровном строении Большого Кавказа // Геотектоника, 1986, № 5, С. 94-106.
2. *Милановский Е.Е., Хаин В.Е.* Геологическое строение Кавказа. М. Изд-во МГУ, 1963, 357 с.
3. *Рогожин Е.А., Яковлев Ф.Л.* Опыт количественной оценки морфологии складчатости Тфанской зоны Большого Кавказа // Геотектоника, 1983, № 3, С. 87-98.
4. *Сомин М.Л.* О структуре осевых зон Центрального Кавказа // Докл. РАН. 2000, Т. 375, № 5, С. 662-665.
5. *Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А.* Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука. 1993. 192 с.
6. *Яковлев Ф.Л.* Оценка деформаций в складчатой области по дисгармоничным складкам // Бюлл. МОИПа, отд. геол., 1978, Т.53(5), С. 43-52.
7. *Яковлев Ф.Л.* Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа). М.: ОИФЗ РАН, 1997, 76 с.
8. *Яковлев Ф.Л.* Реконструкция структур линейной складчатости с использованием объемного балансирования // Физика Земли, 2009а, № 11, С. 1023-1034.

9. *Яковлев Ф.Л.* Опыт построения сбалансированной структуры восточной части альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле, 2012, № 1, С. 191-214.
10. *Yakovlev F.* Experience of faults typology in linear folding and statistic study of their system based on results of balancing sections for North-West Caucasus // Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011-8185, 2011.

Яковлев Ф.Л. Сбалансированная структура восточной части альпийского осадочного чехла Большого Кавказа по данным анализа деформаций в линейной складчатости // Третья тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Материалы докладов конференции 8-12 октября 2012. М.: ИФЗ РАН. 2012. т.2. с.77-81.