

# ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ АЛЬПИЙСКОГО БОЛЬШОГО КАВКАЗА ПО ПАРАМЕТРАМ СБАЛАНСИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ЕГО СТРУКТУРЫ (ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ)

Ф.Л. Яковлев, Е.С. Горбатов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, yak@ifz.ru, e.s.gor@mail.ru

Геодинамические модели развития и преобразований континентальной земной коры являются теоретической основой значительного числа частных моделей строения и развития крупных регионов, и их использование может оказывать заметное влияние на экономику (например, при решении проблемы государственной принадлежности Арктических регионов, при разработке региональных прогнозов оценки запасов минеральных ресурсов). Эти модели играют заметную роль в оценках ряда опасных природных явлений, в частности – в прогнозах места и силы землетрясений. В условиях быстрого развития в последние десятилетия современных технологий научных исследований, опирающихся на численные методы, в том числе – на методы механики, заметен рост значения моделей тектонофизики, которые позволяют (в широком смысле) проводить сравнения параметров теоретических общих и частных геодинамических моделей с параметрами моделируемых природных структур с целью определения, во-первых, физической возможности существования моделируемых процессов, а во-вторых, производить отбор и уточнение таких моделей по критерию соответствия параметров этих моделей измеряемым свойствам реальных природных объектов.

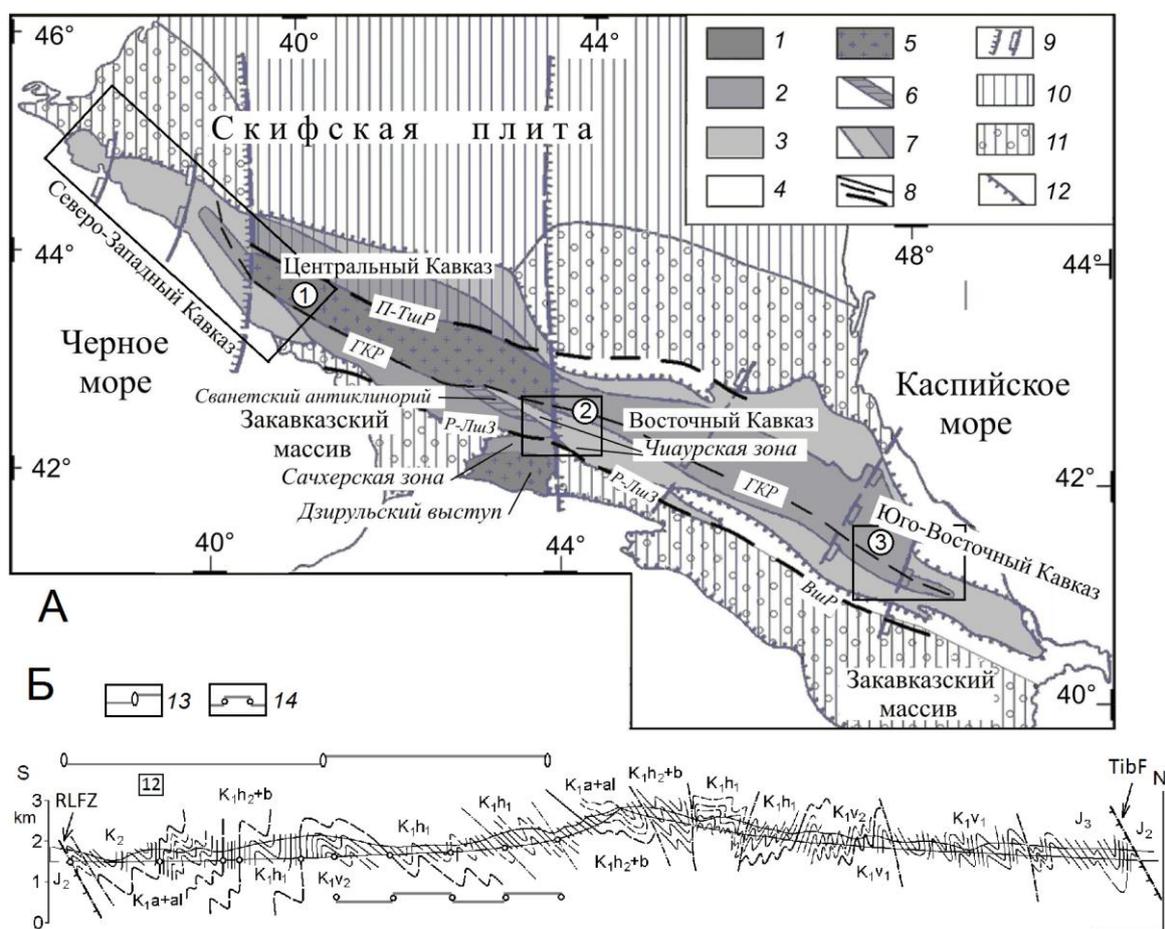
В настоящее время к основным геодинамическим моделям на глобальном уровне следует отнести теорию литосферных плит, имеющую в своей основе термическую конвекцию в мантии, а на региональном уровне, в пределах зон коллизии складчато-надвиговых поясов, – схемы аккреционных призм, А-субдукции, или *accretionary wedges*. Однако в последнее время исследования, посвященные детальному описанию таких структур в разных масштабах, а также расшифровке их тектонической истории, начинают сталкиваться с несоответствием теоретических схем и реально существующих структур. Так, появляются работы, в которых вынужденно модифицируются основные теоретические постулаты тектоники плит [Лобковский, 2016] – плиты оказываются деформируемыми, а не жесткими. В детальных описаниях ряда альпийских структур Европы показано, что механизм формирования аккреционных конструкций оказывается связан не с боковым сжатием, а является результатом центробежного отступления (*rollback*) «островных дуг» [Jolivet et al., 2006; Nemok et al., 2006]; в то же время блоки океанической коры ряда внутренних средиземных морей оказываются не остатками древнего (мезозойского) океана Тетис, а следствием молодого (10-15 млн. лет) процесса разрушения континентальной коры [Aslanian et al., 2013].

На региональном уровне к таким же конфликтам методического характера следует относить споры о типе строения структур земной коры и осадочного чехла альпийского Большого Кавказа (БК) [Saintot et al., 2006]: здесь сталкиваются представления о ведущей роли пологих надвиговых структур в масштабах коры [Дотдугев, 1986; Mosar et al., 2010], которыми исследователи объясняют особенности строения и истории развития БК, с данными о реальности существования только субвертикальных крупных разломов коро-мантийного масштаба [Сомин, 2000; Яковлев, 2012, Шемпелев и др., 2001; Рогожин и др., 2014]. Для этого же региона существующее стремление объяснить все события формирования складчатой и воздымания горной структуры БК одним механизмом однократного действия в рамках разных схем аккреционного типа [Mosar et al., 2010] противоречит появившимся данным об активности нескольких механизмов, разнесенных во времени (например, [Trifonov, Sokolov, 2014], с. 504-505), или предположениям о параллельном или последовательном действии до пяти разных механизмов [Яковлев, Юнга, 2010]. Понятно, что ряд таких противоречий не может быть решен только в рамках конкуренции качественных (не количественных) умозрительных моделей, опирающихся на эмпирические наблюдения – к анализу следует привлекать количественные модели, основанные на измеряемых параметрах природного материала.

Для альпийского Большого Кавказа существует фактический материал, пригодный для проверки (или построения) геодинамических моделей или, более узко, для выявления действующих механизмов формирования как складчатой структуры, так и воздымания горного сооружения – это данные о складчатой структуре региона, собранные при выполнении многолетних специальных полевых работ [Рогожин, Яковлев, 1983; Яковлев, 1997; Гиоргобиани, Закарая, 1989]. Эти данные содержат в себе детальную информацию о типе и величине больших деформаций, с которыми

связано формирование структуры Большого Кавказа в масштабе всего осадочного чехла, то есть они могут быть источником материала для тектонофизических исследований.

Альпийская складчатая система Большого Кавказа находится на северном фланге Альпийско-Гималайского подвижного пояса и принадлежит цепочке прямолинейных структур Крыма, Большого Кавказа, Большого Балхана, Копет-Дага. Структуре и истории развития региона посвящено большое количество монографий и крупных статей [Милановский, Хаин, 1963; Милановский, 1968; Гамкрелидзе, Гамкрелидзе, 1977; Шолпо, 1978; Дотдугев, 1986; Панов, 1988; Шолпо и др., 1993; Сомин, 2000; Saintot et al., 2006; Большой Кавказ, 2007; Маринин, Расцветаев, 2008, Somin, 2011]. В тектоническом отношении Большой Кавказ находится между Скифской пост-герцинской плитой на севере и несколькими структурами бассейна Черного моря (рис. 1А), Закавказского срединного массива и впадины Южного Каспия на юге. Основная альпийская структура внутри Большого Кавказа, имеющая интенсивную складчатость, расположена между двух крупных долгоживущих разломов глубокого заложения – Пшекиш-Тырныаузского на севере и Рача-Лечхумского на юге. Вдоль простирания в Большом Кавказе выделяются четыре сектора [Шолпо, 1978], которые отличаются в целом глубиной фундамента, стратиграфическим уровнем пород, выходящих на поверхность, стилем деформаций и особенностями истории тектонического развития.



**Рис. 1.** (А) Схема строения мегантиклинория Большого Кавказа (по [Яковлев, 2010], с изменениями; использован рисунок из [Шолпо, 1978]). Показаны четыре сектора – Северо-Западный Кавказ (СЗК), Центральный Кавказ, Восточный Кавказ, Юго-Восточный Кавказ; Скифская плита и Закавказский массив, основные разломы; три прямоугольниками с цифрами показаны районы исследований складчатой структуры; 1 – палеозойские отложения; 2 – нижне и среднеюрские отложения; 3 – верхнеюрские, меловые и нижне-кайнозойские отложения; 4 – кайнозойские отложения от олигоценых до четвертичных; 5 – выходы палеозойского и докембрийского фундамента; 6 – выходы палеозойских пород южнее Главного Кавказского разлома; 7 – границы основных возрастных подразделений и тектонических зон; 8 – разрывы на границах тектонических зон и всего сооружения (П-ТшР – Пшекиш-Тырныаузский шовный разлом, ГКР – Главный Кавказский разлом, Р-ЛшЗ – Рача-Лечхумская шовная зона, ВшР - Вандамский шовный разлом); 9 – основные поперечные структуры на границах секторов и внутри секторов; 10 – стабильные блоки за пределами Большого Кавказа (раннекайнозойская Скифская плита, Закавказский массив); 11 – осадочные прогибы в пределах стабильных блоков; 12 – границы горных сооружений.

(Б) Пример структурного профиля 1:100 000 масштаба, Чиатурская тектоническая зона, второй район исследований. 13 – границы двух структурных ячеек; 14 – границы складчатых доменов

Альпийский осадочный чехол БК образован рядом стратиграфических единиц от нижней юры до эоцена общей мощностью до 10-15 км. Нижняя часть чехла начинается с конгломератов синемюрского яруса, которые выше сменяются толщами бескарбонатных (глубоководных) тонкозернистых глинистых сланцев, а также чередующимися сланцами и песчаниками нижней и средней юры общей мощностью 5-7 км. Начиная с верхней юры в южной и центральной части Большого Кавказа верхняя часть осадочного чехла выполнена карбонатными и терригенно-карбонатными в основном флишевыми осадками мощностью в 6-8 км. Ряд крупных продольных разломов разделяет друг от друга относительно крупные тектонические единицы – тектонические зоны. Самый крупный разлом внутри БК, Главный Кавказский разлом (ГКР), проходящий примерно вдоль продольной оси всего альпийского сооружения, разделяет северную и южную части Большого Кавказа, которые имеют разную историю тектонических движений. В северных тектонических зонах (Шахдагская зона, Сланцевый Дагестан, Известняковый Дагестан) на границе средней и поздней юры имело место возникновение относительно слабой складчатости, и, начиная с этого момента, здесь накапливались маломощные (1-2 км) мелководные субплатформенные карбонатные осадки, в конце альпийского орогенеза (после эоцена) смятые в крупные пологие или коробчатые складки. Как уже было сказано выше, в южной половине Большого Кавказа в пределах Тфанской (Гойтхской) тектонической зоны и Чиаурской (Лазаревской) флишевой тектонической зоны, начиная с поздней юры были накоплены упомянутые выше основные мощности осадочного чехла. После эоцена здесь возникла интенсивная мелкая линейная складчатость общего смятия. В Центральном секторе БК в Гагро-Джавской (Абхазской) тектонической зоне, расположенной к югу от Чиаурской зоны, ближе к Закавказскому массиву, имел место тип развития Шахдагской зоны с промежуточной складчатостью перед поздней юрой и последующим накоплением субплатформенных толщ верхней юры – эоцена.

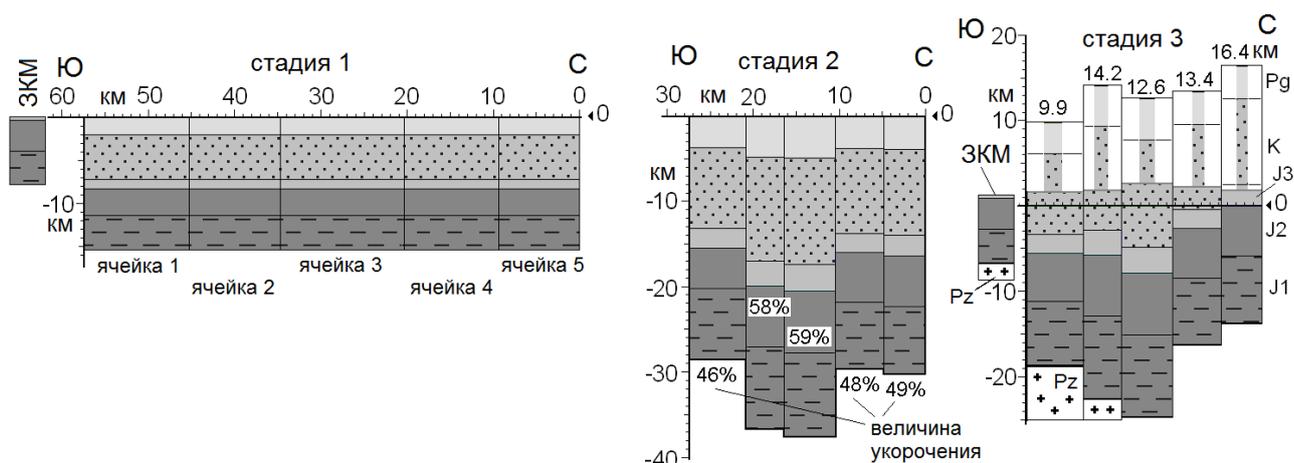
Время и продолжительность основной складчатости в пределах БК являются предметом дискуссии, но заметное число исследователей ([Милановский, Хаин, 1963; Saintot et al., 2006, Trifonov, Sokolov, 2014] и другие) на основании имеющихся перерывов в осадконакоплении и угловых несогласий, а также с учетом характера осадков нижней и верхней моласс, считают, что основная складчатость началась после эоцена и закончилась перед сарматом (средний миоцен). Этому периоду соответствует достаточно мощная толща нижней молассы – майкопская серия, – отложения которой наблюдаются в окружающих Большой Кавказ неотектонических депрессиях. Для нижней молассы характерны тонкозернистые терригенные осадки, в основном пески и глины. Считается, что для этого времени пространство Большого Кавказа занимала низкая суша или плоские острова [Милановский, Хаин, 1963]. Начиная с сарматского века, обычно после перерыва или несогласия, повсеместно за пределами БК начали накапливаться осадки более грубые, с конгломератами, что свидетельствует о начале воздымания всего горного сооружения и развития речной сети на больших пространствах суши. Мощность верхней и нижней молассы составляет обычно по 2-3 км, а для осевых частей основных прогибов – до 5-6 км. Во впадине Южного Каспия местами наблюдается накопление до 10 км осадков за последние 5 млн. лет, что отражает, как считается, факт роста скорости поднятия горного сооружения в последние 5-2 млн. лет [Trifonov, Sokolov, 2014].

Складчатая структура Большого Кавказа изучена достаточно полно в результате ряда многолетних полевых работ нескольких групп исследователей [Сорский, 1962; Шолпо, 1978; Шолпо и др., 1993; Рогожин, Яковлев, 1983; Яковлев 1997; Гиоргобиани, Закарая, 1989]. Достоверные стандартные структурные разрезы, прилагаемые к геологическим картам, обычно составляются для регионов, имеющих в основном крупные складки (3-5 км шириной) в осадочном чехле с дробным стратиграфическим делением (по 0.2 – 1 км мощности). Однако структура областей развития мелких складок в монотонных толщах большой мощности (стратиграфические единицы по 1-2 км мощности) не может быть корректно отражена такими разрезами. Связано это с тем, что здесь между соседними геологическими границами на карте, в полосах шириной по 1-5 км, может поместиться несколько крупных (до 0.5-2 км шириной) и большое количество мелких (до 1-2 м шириной) складок, и эта структура не может быть отражена контурами геологических границ. Соответственно, в этом случае основной стиль складчато-разрывной структуры останется неизвестным. Для таких регионов применяется метод практически сплошного сбора структурного материала вдоль профиля с детальной зарисовкой структуры и измерениями всех геометрических параметров ([Шолпо и др., 1993], стр. 8-10). В результате проведения таких специальных работ могут быть получены детальные структурные профили (в идеале – 1:10 000 масштаба) практически «фотографического» качества, которые пригодны для измерения непосредственно на них всех численных параметров. Для Большого Кавказа существует три региона, в которых собран и опубликован такой материал (рис. 1А). Это

Юго-Восточный Кавказ в составе Шахдагской зоны (севернее ГКР) и Тфанской зоны (южнее ГКР), с 10 пересечениями около 100 км общей длины [Рогожин, Яковлев, 1983], Чиаурская зона мелового флиша с тремя профилями (смотри профиль на рис. 1Б) общей длиной 70 км (1:100 000 масштаба, [Яковлев, 1997]) и Северо-Западный Кавказ с 11 пересечениями (общая длина около 350 км), составленными двумя группами исследователей – Т.В. Гиоргобиани [Гиоргобиани, Закарая, 1989] и Е.А. Рогожиным [Шолпо и др., 1993]. Этот материал был использован для создания сбалансированной структуры БК.

Для восстановления доскладчатой и современной структур использовался метод «геометрии складчатых доменов» [Яковлев, 2009], разработанный в рамках представлений об иерархическом устройстве структур линейной складчатости [Яковлев, 2008а]. Для этого в структурном профиле выделялись «складчатые домены» (рис. 1Б, знак 14), в которых измерялись несколько параметров, сопоставляемых с эллипсоидом деформаций (наклон зеркала складок, наклон осевой поверхности складок, угол при вершине складок). Кроме того, измерялась длина и наклон отрезка линии профиля для домена. Каждый домен восстанавливался от современного до исходного доскладчатого состояния тремя кинематическими операциями – поворота, простого сдвига и растяжения. При наличии разрыва, в процессе восстановления вычислялся наклон его плоскости на границе домена и амплитуда смещения. На следующем этапе все доскладчатые состояния доменов соединялись друг с другом с учетом разрывов, и в результате восстанавливалось доскладчатое состояние всего профиля. Соответственно, появлялась возможность вычислить величину сокращения для всего профиля целиком.

Для получения величин сокращения для таких частей профиля, которые были бы по возможности короче, но сохраняли именно «внешнюю», тектоническую компоненту, а не отражали бы по большей части внутреннюю дисгармонию структуры, домены объединялись в «структурные ячейки» (рис. 1Б, знак 13). Основные правила их выделения состояли из двух пунктов: а) по возможности ячейки должны были охватывать пространства от ядра крупной антиклинали до ядра крупной синклинали и б) длина ячейки вдоль доскладчатого профиля должна была быть сопоставима с мощностью всего осадочного чехла. В соответствии с этим, следующая операция заключалась в сборе информации о мощностях всех стратиграфических подразделений или выдвигении обоснованных предположений о таких мощностях с целью получения «стратиграфической модели» для каждой структурной ячейки – т.е. стандартной для данной ячейки оцифрованной стратиграфической колонки. После этого профиль пересчитывался несколько раз до появления сбалансированной структуры для каждой ячейки. Вслед за этим получались величина укорочения структурной ячейки ( $K_f = L/L_0$ ) на основании современной ( $L$ ) и доскладчатой ( $L_0$ ) длин отрезков профиля структурной ячейки. Для материалов СЗК эти параметры отражены в таблице 1 в колонках 3, 4, 5, а также 6 (исходная мощность чехла).



**Рис. 2.** Схема трех условных стадий развития Большого Кавказа и определение амплитуды «неотектонического поднятия» на примере профиля номер 12 Чиаурской зоны (по материалам [Яковлев, 2012]).

ЗКМ – Закавказский срединный массив. Показаны расстояния и глубины в километрах, границы ячеек и позиции подошвы отложений палеогена, мела и юры. Три профиля показывают условные (технические) три стадии развития структуры: 1 – постседиментационный доскладчатый (доолигоценый), 2 – постскладчатый доорогенный (от олигоцена до сармата), 3 – современный посторогенный

**Таблица 1.** Основные измеренные и вычисленные параметры структурных ячеек Северо-Западного Кавказа (пояснения в тексте), по [Яковлев 2009].

Профиль-ячейка	Число доменов	Досклад. длина, км	Соврем. длина, км	Коефф. сокр. $K_f$	Стадия 1, Подошва J	Стадия 2, Подошва J	Стадия 3, Подошва J	Полн. фундам.	Разн. фундам.
1	2	3	4	5*	6*	7	8*	9	10
1A	6	13.6	14.5	1.07	-17	-15.8	-13.3	2.6	3.7
1B	4	18.8	11.7	0.62	-17	-27.3	-22.7	4.6	-5.7
1C	5	17.4	15.4	0.88	-17	-19.3	-17.1	2.2	-0.1
2A	8	13.5	14.9	1.1	-15.2	-13.8	-12.4	1.5	2.8
2B	5	16.1	11.1	0.69	-16.7	-23.3	-18.8	4.5	-2.1
2C	6	11.2	10	0.89	-17.3	-19.4	-15.9	3.5	1.4
3A	6	13.1	10.1	0.77	-14.2	-18.4	-16.7	1.8	-2.5
3B	5	13.7	10.7	0.78	-14.7	-18.8	-12.6	6.2	2.1
3C	6	15.2	9.6	0.63	-17.1	-27.1	-16.8	10.3	0.3
3D	5	15.1	9.7	0.64	-17.1	-26.7	-18.2	8.5	-1.1
3E	8	15.7	10.8	0.69	-17.1	-24.8	-19	5.7	-1.9
3F	4	9.5	4.4	0.47	-17.1	-36.4	-31.7	4.7	-14.6
4A	10	15.9	15.5	0.98	-13.6	-13.7	-11.6	2.2	2
4B	6	13.7	8.7	0.63	-16.2	-20.2	-8.7	11.5	7.5
4C	10	15.8	11.8	0.75	-16.2	-21.6	-12.7	8.9	3.5
4D	4	9.7	4.7	0.48	-16.2	-33.8	-20.7	13	-4.5
4E	5	16.6	8	0.48	-16.3	-34	-27.3	6.7	-11
5A	6	14.4	9.7	0.67	-12.8	-19.1	-11.2	8	1.6
5B	5	16.3	10	0.61	-12.8	-21	-7	14	5.8
5C	3	15.1	5.9	0.39	-12.7	-32.5	-14.2	18.2	-1.5
5D	4	13.2	4.4	0.33	-16.1	-48.8	-26.6	22.2	-10.5
5E	5	23.3	9.3	0.4	-16.1	-40.3	-29	11.3	-12.9
6A	5	12.6	6.1	0.49	-12.8	-26.1	-9.4	16.7	3.4
6B	7	14.4	7.1	0.49	-12.3	-25.1	-5.7	19.4	6.6
7A	7	13.3	7.5	0.56	-8.5	-15.1	-4.4	10.7	4.1
7B	6	8.7	6.3	0.73	-11.5	-15.8	-4.6	11.2	6.9
7C	11	14.6	9.6	0.66	-15.1	-22.9	-13.2	9.7	1.9
7D	6	12.7	7	0.55	-9.8	-17.8	-6.9	10.9	2.9
7E	3	9.2	4.5	0.49	-9.8	-19.9	-7.7	12.2	2.1
8A	6	10.5	5.6	0.54	-9.1	-16.9	-3.6	13.3	5.5
8B	7	11.4	7.5	0.66	-16.1	-24.4	-12.4	11.9	3.7
8C	4	12.7	4.6	0.36	-16.1	-44.7	-25.1	19.6	-9
8D	6	12.7	9.8	0.77	-10.8	-14	-7.9	6	2.9
8E	4	8.3	7	0.84	-10.8	-12.8	-10	3.4	0.8
9A	5	6.6	3.2	0.49	-8.8	-17.9	-5.6	12.3	3.2
9B	8	11.5	7.9	0.69	-8.8	-12.4	-2.2	10.2	6.6
10A	5	10.1	3.7	0.37	-9.8	-26.4	-15.2	11.1	-5.4
10B	5	6.7	4.4	0.65	-10.8	-16.5	-8.3	8.2	2.5
10C	5	6.9	5.5	0.8	-10.8	-13.4	-6.9	6.5	3.9
10D	6	8.9	7.3	0.82	-7.6	-9.1	-9.1	0	-1.5
10E	5	7.6	6.3	0.83	-7.3	-8.7	-8.6	0	-1.3
11A	6	8.3	4.9	0.59	-8.8	-14.8	-5.4	9.6	3.4

Для дальнейших операций использовалась условная схема последовательности стадий развития Большого Кавказа, состоящая из трех стадий (рис. 2). Первая стадия – это доскладчатое состояние структуры перед началом основной складчатости, после накопления осадков. На второй стадии

реализуется все сокращение ячеек без подъема и размыва верхней части осадочного чехла (что не обязательно имеет место в природе, но удобно для вычислений). На этой стадии исходная мощность чехла увеличивается в соответствии с величиной укорочения (колонка 7, таблица 1). На третьей стадии вся сформированная складчатая структура выдвигается вверх с размывом своей верхней части. Для того, чтобы определить последнюю величину, производились два дополнительных вычисления. В стратиграфической модели ячейки каждый слой в доменах при вычислениях имел определенную глубину (в исходном состоянии). Соответственно, для каждого домена могла быть вычислена глубина домена (слоев на линии профиля) в стратиграфической колонке, и далее путем усреднения этих данных получалась «стратиграфическая» глубина для всей ячейки. Указанная глубина в современной структуре находится на линии профиля на определенной гипсографической высоте, которая также легко вычисляется для всех доменов и усредняется для ячейки. Для определения высоты «неотектонического» поднятия исходная «стратиграфическая» глубина профиля в ячейке сначала увеличивается на стадии 2 в соответствии с величиной укорочения, например -5000 м после 50% укорочения становится -10000 м. Но эта часть профиля в современной структуре наблюдается на высоте 1 км. Соответственно, всю структуру надо поднять на 11000 м для того, чтобы вертикальные позиции модельной и природной структур в этом параметре совпали (колонка 9 таблицы 1). Разумеется, та же величина (11000 м) использовалась для вычисления положения современной подошвы осадочного чехла от позиции подошвы чехлы на стадии 2 (колонка 8 таблицы 1), она же считалась амплитудой неотектонического поднятия или виртуальной высотой кровли осадочного чехла. Кроме указанных параметров, интересен параметр «разница глубин фундамента» (колонка 10, таблица 1), определяемая как разница глубины кровли фундамента между исходным положением (стадия 1) и современной структурой (стадия 3). Эти данные были получены для всех трех регионов в 78 структурных ячейках и представляли собой сбалансированную модель структуры в пределах осадочного чехла.

Следующий этап создания сбалансированной модели Большого Кавказа касался уже перехода на структуры другого уровня – для всей земной коры по уровню слоистости и для тектонических зон по уровню иерархии. Для этого в пределах восточной половины Большого Кавказа для Чиаурской, Тфанской и Шагдагской зон Большого Кавказа (с юга на север) были усреднены величины укорочения, которые составили, соответственно, 53%, 53% и 41% [Яковлев, 2012]. Одной из целей построения такой модели было проследить за перемещениями поверхности Мохо на протяжении всей истории тектонических движений в рамках сбалансированной модели. Опираясь на факт наличия базальных конгломератов в основании альпийского осадочного чехла, находящихся на поверхности размытых палеозойских пород, смятых в складки в конце герцинского орогенеза, мы приняли исходную мощность коры на начало юрского периода в 40 км, стандартную для континентальной коры. Накопленная мощность осадочного чехла в 15 км для Чиаурской зоны и последующее двукратное сокращение пространства, должны были опустить породы на уровне бывшей Мохо на глубину 100-110 км (при условии сохранения плотности и объема всех пород). Совершенно очевидно, что такая модельная структура в реальности не могла возникнуть, поскольку явление изостазии не позволяет находиться породам коры на такой глубине. Данные геофизических исследований БК [Павленкова, 2012] указывают на положение современной границы Мохо для Чиаурской зоны на глубине в два раза меньшей (55 км), чем расчетная. Это означает, что современная граница Мохо является сугубо геофизической, возникшей недавно, и не связана никак с уровнем Мохо в предыдущие этапы развития. Эти данные также означают, что следует принять за факт такие преобразования пород в нижней части коры, которые позволяют им приобретать плотность пород мантии. Только в этом случае вся структура может быть сбалансирована по величинам деформации, объемам осадочного чехла и наблюдаемой на поверхности современной складчато-разрывной структуре.

Анализ полученных данных в масштабе осадочного чехла (для структурных ячеек) выявил некоторые важные особенности структуры [Яковлев, 2008б; 2012; 2015а; 2015б]. Прежде всего, оказалось, что глубины кровли фундамента на стадии 1 и стадии 3 для СЗК и для трех зон восточной части БК оказались очень близкими величинами – для СЗК это 13.4 и 13.2 км соответственно, а для трех зон (13 профилей) – это 13.6 км и 15.1 км. При анализе распространения параметра «разница глубин фундамента» вдоль простирания СЗК было найдено, что средние величины параметра для профилей не сильно отличались от нуля – их значения лежали в диапазоне от +3.5 до -3.5 км. То есть, указанный параметр показывал заметную устойчивость вдоль структуры. Напротив, вкрест простирания отклонения параметра были очень серьезными – от +7.5 км (ячейка 4В) до -14.6 (ячейка 3F). Эти данные говорят о том, что на процессы формирования складчатой структуры, а также на

подъем горного сооружения явно оказывает влияние изостазия. Кроме этого, было найдено, что ряд параметров как для СЗК, так и для трех зон восточной части БК имеют значимые корреляции между собой [Яковлев, 2008б]. Так, для части выборки (без ячеек со слабым сокращением) были найдены связи между величиной сокращения и амплитудой поднятия ( $r = 0.78$ ), величиной сокращения и разницей глубин фундамента ( $r = 0.58$ ), между начальной мощностью и разницей глубин фундамента ( $r = 0.54$ ). При попытке определения генетических зависимостей (причинно-следственных связей параметров) была использована идея времени возникновения параметров (следствие не может опережать причину). С этой позиции было определено, что поскольку начальная мощность опережает по времени возникновения все другие параметры, а сокращение является вторым параметром, то можно ожидать выявления соответствующих генетических связей [Яковлев, 2015б]. Например, параметр «разница глубин фундамента» зависит и от сокращения, и от начальной мощности чехла. Эти и другие корреляции будут рассмотрены ниже.

Поскольку, как это было показано во вводной части статьи, основные обсуждаемые геодинамические модели и процессы являются скорее гипотетическими, чем реальными, и поскольку такие процессы могут воздействовать вместе или раздельно сразу на несколько регистрируемых параметров, то задача статистически значимого выявления таких процессов индивидуально по каким-либо отдельным параметрам и/или их корреляционным связям может не иметь однозначного решения. В свете такой постановки проблемы было решено на базе материалов сбалансированной модели в целях выявления геодинамических процессов попробовать использовать факторный анализ, при котором численные параметры 78 структурных ячеек будут использоваться как исходный статистический материал. При этом анализе предполагалось, что если какие-то сочетания корреляций будут соответствовать некоторому одному природному процессу, то это проявится в виде вполне определенного фактора. Поэтому можно ожидать, что за теми факторами, которые будут выявлены при анализе природного статистического материала, будут стоять геодинамические природные процессы. Их генезис и относительный вес в первом приближении могут быть также выявлены.

В качестве основных анализируемых параметров были определены следующие характеристики структурных ячеек: начальная мощность осадочного чехла ( $h_1$ ), или доскладчатая глубина кровли фундамента (ГКФ), величина укорочения коры ( $Sh = (L_0 - L)/L_0$ , %), постскладчатая ( $h_2 = h_1 L_0/L$ ) и современная ГКФ ( $h_3$ ), неотектоническое поднятие ( $h_3 - h_2$ ) и общая разница ГКФ ( $h_3 - h_1$ ).

Для выявления генетических связей между параметрами были вычислены линейные коэффициенты корреляции (Таблица 2). При этом из рассмотрения были исключены значимые корреляции между параметрами вычисленный/вычисленный, которые указывают лишь на формульные зависимости в использованной сбалансированной модели и не имеют отношения к природным процессам. Для иллюстрации характера связей параметров на рис. 3 приведены некоторые диаграммы рассеяния, показывающие зависимости между парами параметров с высокими (А) и умеренными (В) коэффициентами корреляции. На графиках «А» хорошо видна вытянутость ареалов точек, что качественно указывает на значительную силу связей.

**Таблица 2.** Матрица корреляций параметров структурных ячеек (N=78)

	Параметры		Коэффициенты корреляции					
			(1) $h_1^*$	(2) $Sh^*$	(3) $h_2$	(4) $h_3$	(5) $h_3 - h_2^*$	(6) $h_3 - h_1$
1	исх. мощность (ГКФ)	$h_1^*$	1	-0.023	<b>0.565</b>	<b>0.708</b>	-0.126	<b>0.379</b>
2	укорочение	$Sh^*$		1	<b>-0.783</b>	<b>-0.361</b>	<b>0.818</b>	<b>-0.461</b>
3	ГКФ, стадия 2	$h_2$			1	<del>0.759</del>	<b>-0.737</b>	<del>0.685</del>
4	ГКФ, стадия 3	$h_3$				1	-0.119	<del>0.922</del>
5	ампл. поднятия	$h_3 - h_2^*$					1	-0.087
6	разница ГКФ(3-1)	$h_3 - h_1$						1

Примечания:

- 1) Жирным шрифтом выделены корреляции с  $p < 0.05$  при  $N=78$  (превышающие доверительные границы нулевой гипотезы, т.е. корреляции являются неслучайными, значимыми)
- 2) \*параметры, непосредственно полученные из сбалансированной модели (измеренные); физический смысл имеют корреляции между измеренными/измеренными, измеренными/вычисленными параметрами.
- 3) Зачеркнуты корреляции между параметрами вычисленные/вычисленные, которые по смыслу корреляционного анализа являются некорректными, поскольку отражают вычислительные формулы

Как уже говорилось выше, найденные корреляции параметров могут быть описаны небольшим числом независимых переменных, количественно характеризующих различные геодинамические процессы. Для разделения этих процессов применен факторный анализ массива данных. С этой целью с помощью статистической программы «Statistica» было проведено последовательное выделение факторов (новых переменных) методом «Varimax», основанном на вращении пространства исходных переменных, максимизирующем дисперсию. В результате проведенного анализа было выделено два фактора ( $F_1$ ,  $F_2$ ), объясняющих соответственно 60% и 27% общей дисперсии. Суммарная объясненная дисперсия достигает 87%, что показывает высокую степень соответствия двухфакторной модели исходным данным.

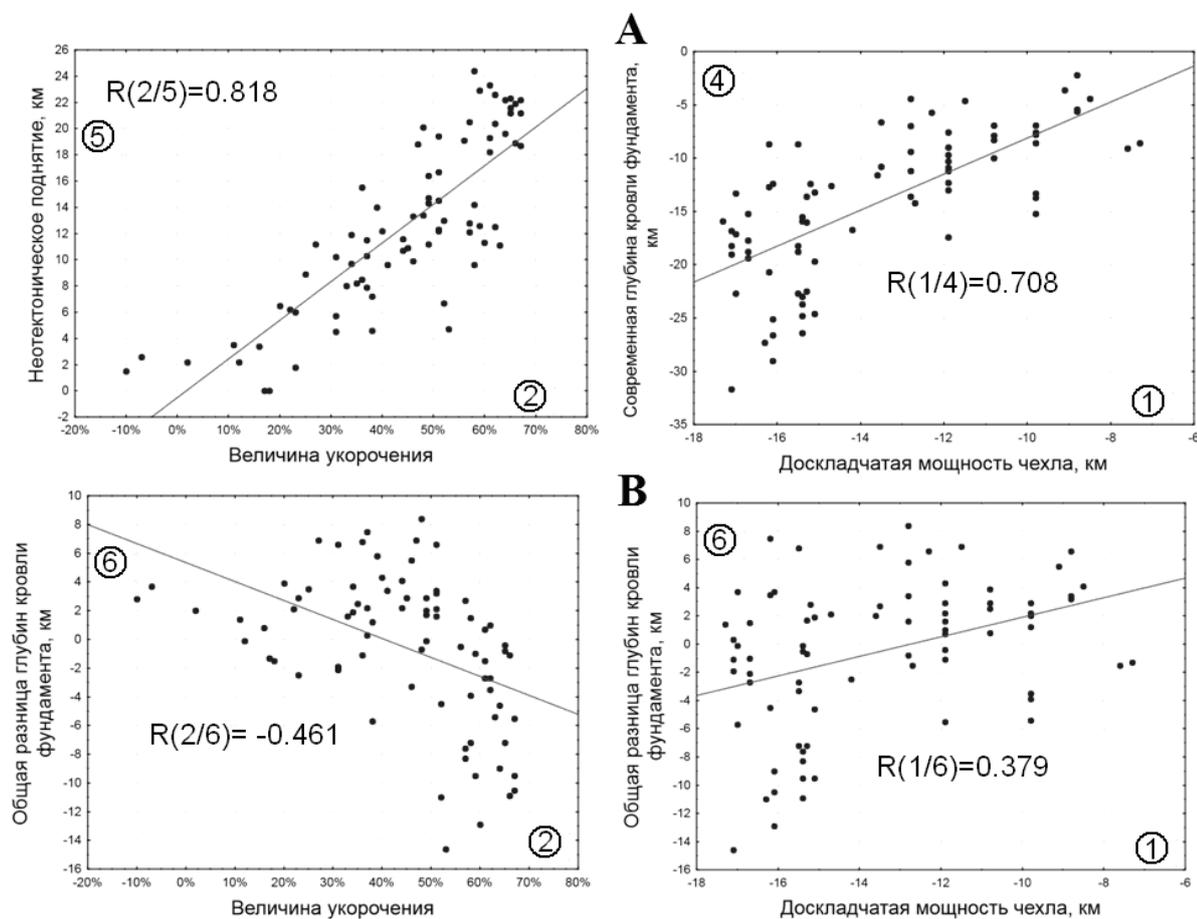


Рис. 3. Диаграммы рассеяния для некоторых пар параметров структурных ячеек (номера признаков в кружках, которые откладывались по осям, соответствуют номерам в таблице 2)

Таблица 3. Факторные нагрузки параметров

Параметры			Факторные нагрузки	
			$F_1$	$F_2$
1	исх. мощность (ГКФ)	$h1^*$	0.022	<b>0.790</b>
2	укорочение	$Sh^*$	<b>0.938</b>	-0.195
3	ГКФ, стадия 2	$h2$	<b>-0.736</b>	0.665
4	ГКФ, стадия 3	$h3$	-0.158	<b>0.982</b>
5	ампл. поднятия	$h3-h2^*$	<b>0.957</b>	0.050
6	разница ГКФ(3-1)	$h3-h1$	-0.219	<b>0.853</b>
Веса факторов, %			60	27

Примечание: Жирным шрифтом выделены высокие нагрузки (>0.7)

Далее были рассчитаны нагрузки (корреляций) факторов по исходным параметрам развития структурных ячеек (таблица 3). Из приведенной таблицы видно, что  $F_1$  имеет высокие нагрузки по признакам: величина укорочения (2) и амплитуда перемещения кровли фундамента при горообразовании (5); нагрузка по признаку (3) «глубина кровли после складчатости» также является большой, но она объясняется формулой вычисления признака (произведение первого и второго признаков);  $F_2$  – доскладчатая (1) и современная ГКФ (4) и их разность (6). Последний параметр вычисляется по первым двум, поэтому он не самостоятелен. На основании этих данных может быть дана следующая интерпретация выделенных факторов:

Фактор 1. Величина горизонтального укорочения определяет амплитуду неотектонического поднятия кровли фундамента; этот фактор никак не связан с первоначальной мощностью осадочного слоя.

Фактор 2. Современная глубина кровли фундамента определяется в основном только ее доскладчатой глубиной и практически не зависит от величины горизонтального укорочения, что можно объяснить каким-то механизмом, обеспечивающим стремление структуры к изостатическому равновесию по уровню ГКФ.

### Заключение

Впервые на достоверном статистическом уровне установлено, что при формировании Большого Кавказа, как его альпийской складчато-разрывной структуры, так и в поднятии горного сооружения, проявляются, по крайней мере, два геодинамических процесса: деформация укорочения коры при складкообразовании под действием, вероятно, внешнего относительного сжатия, а также участие изостатических (внутренних) сил, связанных, вероятно, с изменением плотностей горных пород коры и мантии.

### Литература

1. Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Отв. ред. Ю.Г. Леонов. М.: ГЕОС, 2007. 368 с.
2. Гамкрелидзе П.Д., Гамкрелидзе И.П. Тектонические покровы Южного склона Большого Кавказа // Труды Геол. ин-та АН ГССР. Вып. 57. Тбилиси: Мецниереба. 1977. 82 с.
3. Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм её формирования. Тбилиси: Мецниереба. 1989. 60 с.
4. Дотдугев С.И. О покровном строении Большого Кавказа // Геотектоника. 1986. № 5. С. 94-106.
5. Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 476-495.
6. Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Отв. ред. Ю.Л. Ребецкий. М.: Изд. ИФЗ РАН. 2008. С. 191-224.
7. Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. М.: Изд-во МГУ. 1963. 357 с.
8. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра. 1968. 483 с.
9. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное-Бакуриани и Волгоград-Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных) // Физика Земли. 2012. № 5. С. 16-25.
10. Панов Д.И. Структурно-фациальное районирование Большого Кавказа на раннеальпийской стадии его развития (ранняя и средняя юра) // Бюлл. МОИП, отд. геол. 1988. Т. 63. № 1. С. 13-24.
11. Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Заалишвили И.Б., Степанова М.Ю., Зайцева Н.В., Харазова Ю.В. Новые данные о глубинном строении, тектонике и геодинамике Большого Кавказа // Тектоника складчатых поясов Евразии. Материалы Тектонического совещания. Т.2. М.: ГЕОС. 2014. С. 125-130.
12. Рогожин Е.А., Яковлев Ф.Л. Опыт количественной оценки морфологии складчатости Тфанской зоны Большого Кавказа // Геотектоника. 1983. № 3. С. 87-98.
13. Сомин М.Л. О структуре осевых зон Центрального Кавказа // Доклады РАН. 2000. Т. 375, № 5. С. 662-665.
14. Сорский А.А. Об условиях формирования полной складчатости в осевой зоне Восточного Кавказа // Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М.: Изд-во АН СССР. 1962. С. 9-41.

15. 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. Материалы Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2001. Т. 2. С. 316-320.
16. Шолто В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра. 1978. 176 с.
17. Шолто В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука. 1993. 192 с.
18. Яковлев Ф.Л. Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа). М.: ОИФЗ РАН. 1997. 76 с.
19. Яковлев Ф.Л. Многограновый деформационный анализ структур линейной складчатости // Доклады Академии Наук. 2008а, т. 422. № 3. С. 371-376.
20. Яковлев Ф.Л. Исследование постскладчатого горообразования — первые результаты и подходы к диагностике механизмов на примере Северо-Западного Кавказа // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2008б. Т. 2. С. 510-515.
21. Яковлев Ф.Л. Реконструкция структур линейной складчатости с использованием объемного балансирования // Физика Земли. 2009. №. 11. С. 1023–1034.
22. Яковлев Ф.Л. Деформационный многограновый анализ и структурные парагенезы: сравнение подходов и результатов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 179-193.
23. 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.
24. Яковлев Ф.Л. Многограновый деформационный анализ линейной складчатости на примере альпийского Большого Кавказа / Диссертация на ученую степень д.г.-м.н. по специальности 25.00.03 «Геотектоника и геодинамика». ИФЗ РАН, 2015а. 472 с. рукопись
25. Яковлев Ф.Л. О свидетельствах влияния изостазии на формирование складчатой и орогенной структуры Большого Кавказа // Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты. Материалы Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2015б. С. 314-318.
26. Яковлев Ф.Л., Юнга С.Л. О расширении представлений о механизмах горообразования на примере исследований структур Памирского синтаксиса и Большого Кавказа // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. Материалы Тектонического совещания. Т.2. М.: ГЕОС. 2010. С. 481-485
27. Aslanian D., Moulin M., Rabineau M., Afilhado A., Bache F., Leroux E., Klingelhoefer F., Schnurle P., Matias L., Gorini C. Passive margin genesis: towards a general model? The insight of the Liguro-Provençal basin / Proceedings of ILP Marseille 2013. The Circum-Mediterranean basins and analogues. 2013. P. 7-12.
28. Jolivet, L., Augier, R., Robin, C., Suc, J. P., Rouchy, J. M. Lithospheric-scale geodynamic context of the Messinian salinity crisis // Sedimentary geology, 2006. 188, P. 9-33.
29. Mosar J., Kangarli T., Bochud M., Brunet M.-F., Glasmacher U.A., Rast A., Sosson M. Cenozoic-Recent tectonics and uplift in the Greater Caucasus: a perspective from Azerbaijan // Geological Society London, Special Publication. 2010. V. 340. P. 261-280.
30. Nemok M., Pogcss G., Pospil L. Activity timing of the main tectonic systems in the Carpathian–Pannonian region in relation to the rollback destruction of the lithosphere / J. Golonka and F. J. Picha, eds. The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources // AAPG Memoir. 2006. N 84. P. 743-766.
31. Saintot A., Stephenson R., Brunet M.-F., Sébrier M., Yakovlev F., 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, London. Memoirs. 2006. 32. 277–289.
32. Somin, M.L. Pre-Jurassic basement of the Greater Caucasus: brief overview // Turkish J. Earth Sci. 2011. V. 20. P. 545-610.
33. Trifonov, V.G. Sokolov S.Y. Late Cenozoic tectonic uplift producing mountain building in comparison with mantle structure in the Alpine-Himalayan Belt // International Journal of Geosciences. 2014. 5. P. 497-518.