

8. *Condie K.* High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 491-504.

9. *Цветков А.А.* Магматизм и геодинамика Командорско-Алеутской островной дуги. М.: Наука, 1990. 325 с.

10. *Kay S.M., Kay R.W.* Aleutian magmas in space and time // *Decade N. Amer. Geol.* 1990. Vol. 12. P. 438-518.

Ф.Л. Яковлев¹

О свидетельствах влияния изостазии на формирование складчатой и орогенной структуры Большого Кавказа

Решение проблемы механизмов образования складчатых структур, также как вопроса о процессах формирования горных сооружений, в методологическом отношении находится не на пути создания еще одной или нескольких геодинамических умозрительных схем, а в направлении разработки численных моделей анализируемых процессов. Желательно, чтобы эти модели количественно описывали процессы в таких параметрах, которые могут быть проверены (измерены) непосредственно на природных объектах. Величина укорочения складчатой структуры в масштабе всего осадочного чехла, а также восстановленные (прогнозные) положения ее границ, их смещения относительно исходного положения могут быть основными параметрами такого описания.

Эти и другие величины были получены при составлении сбалансированных разрезов по методу геометрии «складчатых доменов» [1, 3]. Для этого детальные структурные профили 10-30 км длиной делились на домены шириной 0.3-1 км, имеющие внутри себя обычно от 2 до 5 складок. В доменах производились замеры трех параметров, связанных с эллипсоидом деформации этой структуры: наклона зеркала складок, наклона осевой поверхности и угла между крыльями складок (он пересчитывался на величину их укорочения). Восстановленные доскладчатые домены с учетом смещений по разрывам объединялись, образуя доскладчатый профиль. В таком профиле каждые несколько доменов объединялись в «структурные ячейки», ширина которых в сумме примерно равна мощности осадочного чехла. По современной и доскладчатой ши-

¹ Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия

рине доменов и ячеек определялась их величина укорочения. По модели стратиграфической колонки осадочного чехла и величине сокращения ячейки определялись новая мощность чехла ячейки и позиции всех границ, включая кровлю и подошву чехла. В расчетах использовалась трехстадийная модель развития структуры Большого Кавказа (БК): А) осадконакопление, Б) складчатое укорочение без размыва кровли чехла, В) неотектоническое поднятие.

С помощью метода были получены данные по 79 структурным ячейкам, включая 42 для Северо-Западного Кавказа (СЗК) [1, 3, 4], 23 для Тфанской и Шагдагской зон (ТШЗ) [5], 14 для Чиаурской зоны (ЧЗ). Ниже эти результаты используются уже в качестве исходного материала для изучения геодинамических процессов. Прежде всего, были проанализированы корреляции шести величин: 1*. величина укорочения (* – измеренный параметр), 2*. исходная мощность чехла (кровля фундамента на стадии А), 3. глубина фундамента постскладчатая (стадия Б, расчет по параметрам 1 и 2), 4. современная глубина фундамента (стадия В, расчет по 3 и 5), 5*. «амплитуда неотектонического поднятия», 6. разница глубин кровли фундамента (разница между стадиями В и А, расчет по параметрам 2 и 4). Для структур СЗК в выборках полной и очищенной (в которой исключены 10 ячеек со слабой складчатостью) обнаружены следующие корреляции параметров: 1/5 $R=0.79$ (0.59), сильная связь; 1/6 $R=-0.40$ (-0.52) умеренная; 2/6 $R=0.40$ (0.54) умеренная. Вычисленные ошибки и доверительные интервалы подтверждают существование устойчивых связей для обеих выборок. Те же корреляции для структур ТШЗ и ЧЗ вместе составили значения R (1/5, 1/6, 2/6) = 0.63, -0.63, 0.36, а все 79 ячеек вместе имеют $R = 0.81, -0.44, 0.39$. С учетом того, что эти параметры исторически появлялись не одновременно («2» на стадии А; «1» и «3» на стадии Б; «4», «5», «6» на стадии В), а выясняемые причинно-следственные связи должны это учитывать, указанные три корреляции получили следующую интерпретацию: чем больше величина укорочения (1), тем глубже соскладчатое и общее опускание (параметры 3 и 6), но разница глубин фундамента (6) в свою очередь зависит от накопленной мощности осадочного чехла (2), а размыв (5) зависит от укорочения (1). Тем самым в численном виде выявлена классическая «геосинклиальная» закономерность развития событий: чем больше накапливаются осадки – тем более сильная возникает складчатость – тем больше поднятие и амплитуда размыва. Получается, что характер образования складчатости и формирования гор задается общим погружением структуры на стадии накопления осадков. По оценкам В.Г. Трифонова [6, стр. 504], максимальная мощность осадков 18 км ($\rho=2.5$ г/см³) для южного склона БК при сохранении изостазии накопилась при мощности

кристаллической части коры в 16 км (для $\rho=2.93 \text{ г/см}^3$). По нашей интерпретации другая часть коры (24 км, от раннеюрской исходной 40 км) тогда должна была в период осадконакопления приобрести плотность, близкую к «мантийной».

По рассчитанным глубинам кровли фундамента было установлено, что южный фланг БК погружен на 10-15 км относительно Закавказского массива. Это означает, что фундамент БК испытал то же сокращение пространства, что и структуры чехла [5]. На основании этого дана оценка современного восстановленного положения пород на уровне раннеюрской границы Мохо на южном фланге БК на глубине 100-110 км. Это означает, что по условию сохранения изостазии складчатость БК могла сформироваться, только если существенные объемы пород коры приобрели «мантийную» плотность [2, 5].

Параметр 6 «разница глубин фундамента» показал свойства, прямо указывающие на значительное влияние изостазии на формирование складчатых и орогенных структур. В СЗК средняя величина этого параметра для 42 ячеек составляет практически «0» (0.13 км), а среднее для всех основных профилей не отклоняется от «0» дальше ± 3.5 км (рис. 1, А). Разумеется, на каждом профиле в конкретных ячейках этот параметр может достигать значительных величин, например, +7 и -15 км. По этому параметру в СЗК выделяется три сектора: профили 1-2 с центральным прогибом, профили 3-5 с опущенным южным флангом и поднятым северным, а 7-10 также, в целом, имеют прогиб в центре (рис. 1, Б).

Анализ средних амплитуд размыва (параметр 5, табл.) указывает на явную связь с укорочением и изостазией: в результате всех движений уровень границы чехол/фундамент всегда сохраняет свое положение, а амплитуда размыва больше при большем укорочении. По трем тектоническим зонам (ЧЗ и ТШЗ) вкост простираения с юга на север по двум параметрам (5 и 6) наблюдается как погружение южного фланга, и так связь с укорочением: -5.20 и +16.07 км при 57% для ЧЗ, +1.38 км и +19.16/55% для ТЗ, -0.40 и +9.64 при 52% для ШЗ. В.Г. Трифонов и С.Д. Соколов [6] провели расчеты эффектов изостазии после воздействия определенных величин укорочения и увеличения мощности коры и чехла. При сравнении расчетных и природных величин неотектонического поднятия ими было обнаружено, что по условиям изостазии следует предположить дополнительное уплотнение мантии и коры на южном фланге БК и их относительное разуплотнение в северных районах. Действительно, на Большом Кавказе наблюдается сложное сочетание процессов складчатости и горообразования: так, Лабино-Малкинская зона на севере не имеет альпийских деформаций, но вовлечена в поднятие, а на юге размытое альпийское складчатое основание в Алазанской

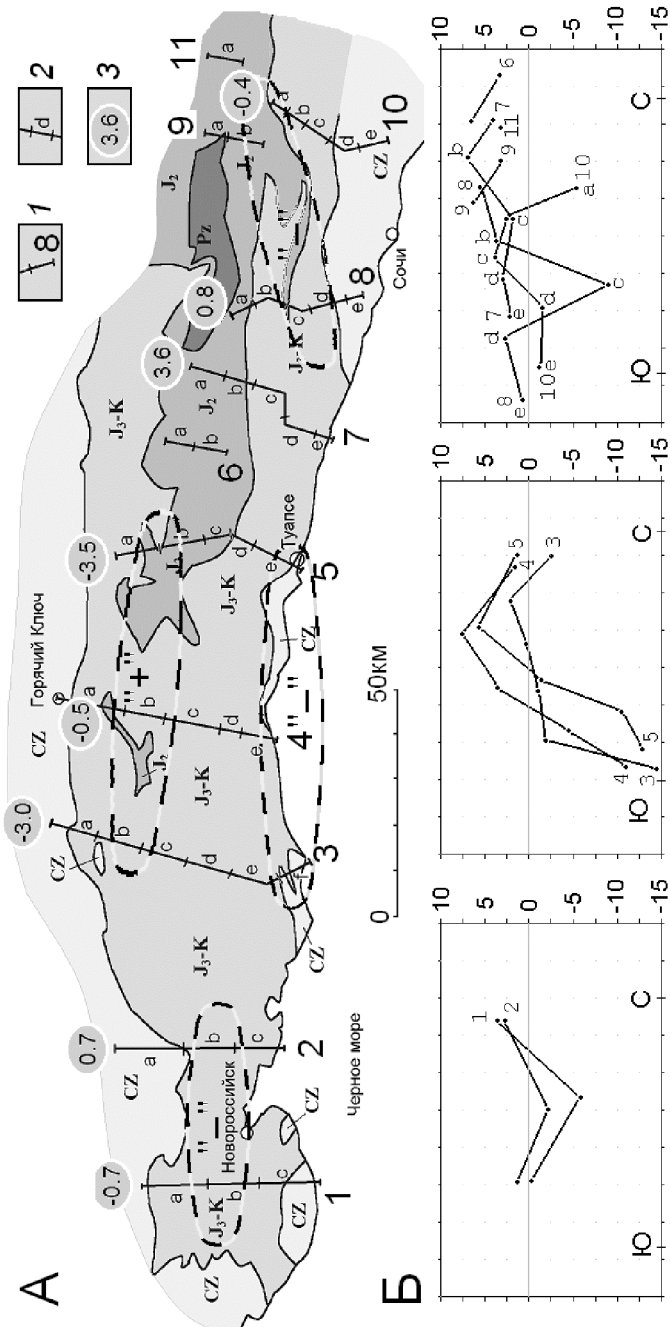


Рис. Схематическая геологическая карта Северо-Западного Кавказа, по [4], с изменениями. 1 - линии профилей (1-11), 2 - структурные ячейки (a-f), 3 - средние значения параметра «6». Б - Распределение параметра «6» (км, вертикальная ось) вкост простирания структуры (условные единицы, горизонтальная ось), по [4]

Таблица. Средние величины параметров 1-6 структурных ячеек
(описание см. в тексте)

Параметры:	1	2	3	4	5	6
СЗК	35%	-13.38 км	-22.2 км	-13.25 км	8.9 км	0.13 км
ТШЗ + ЧЗ	55%	-13.6 км	-31.7 км	-15.1 км	16.6 км	-1.5 км

новейшей депрессии перекрыто сарматскими базальными горизонтами (горообразование здесь отсутствует).

С учетом выявленного действия изостазии можно уточнить схему развития Большого Кавказа: следует предположить, что складчатость сопровождалась размывом верхней части чехла на величину примерно в половину объема расчетного общего размыва (10-15 км). Этот размыв мог формировать осадки нижняя молассы БК.

Выводы. 1) Установлены факты, указывающие на участие изостазии в процессах формирования складчатого и горного сооружения БК. Полученные данные могут быть использованы как исходный материал для выдвижения и проверки геодинамических моделей. 2) Процессы изменения плотности пород земной коры и верхней мантии (как уплотнение, так и разуплотнение) сопровождают процессы складкообразования и горообразования, и должны учитываться в геодинамических моделях.

Литература

1. Яковлев Ф.Л. Исследование постскладчатого горообразования - первые результаты и подходы к диагностике механизмов на примере Северо-Западного Кавказа // Материалы XLI Тектонич. совещ. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 510-515.
2. Яковлев Ф.Л. Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости // Геофизич. Исследования. 2008. Т. 9, № 1. С. 56-75.
3. Яковлев Ф.Л. Реконструкция структур линейной складчатости с использованием объемного балансирования // Физика Земли. 2009. № 11. С. 1023-1034.
4. Яковлев Ф.Л. Квазитрехмерная трехстадийная модель альпийского развития складчатого осадочного чехла Северо-Западного Кавказа по данным о величинах деформаций // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы конф. М.: Изд-во ИФЗ РАН. 2009. Т. 1. С. 439-448.
5. 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.
6. Trifonov V.G., Sokolov S.Yu. Late Cenozoic Tectonic Uplift Producing Mountain Building in Comparison with Mantle Structure in the Alpine-Himalayan Belt. International Journal of Geosciences. 2014, V5. P.497-518.