



<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0329>

THE FIRST EXPERIENCE IN DIAGNOSING THE GEODYNAMIC MECHANISMS OF FOLDING BY THE FACTOR ANALYSIS OF FOLDED STRUCTURE PARAMETERS (GREATER CAUCASUS)

F. L. Yakovlev, E. S. Gorbatov

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Abstract: This article is focused on identifying geodynamic mechanisms leading to formation of large crustal blocks in nature. A specific feature of our study is statistical analysis of the data obtained by the methods of tectonophysics and structural geology. The analyzed material included 24 detailed structural sections (almost 500 km in total length) of Greater Caucasus. The Meso-Cenozoic sedimentary cover, that was intensely folded in the Oligocene and Early Miocene, is 10–15 km thick. A structure balanced in strain amounts and sediments volumes was reconstructed for three stages in the development of the studied area: 1 – pre-folded, 2 – post-folded, 3 – modern post-orogenic. The ‘geometry of folded domains’ method was used. For this purpose, 505 structural domains were identified in the detailed structural sections, the pre-fold state for every domain were reconstructed, and all the domains were aggregated into 78 structural cells. The reconstructions were based on structural indicators measurable in the folds forming the folded domains. Each structural cell was characterized by six parameters: an amount of shortening; depths of the basement top in the pre-folded, post-folded, and modern stages (i.e. stages 1, 2, and 3, respectively); a calculated position of the eroded top of the sedimentary cover (i.e. amplitude of orogenic uplifting); and a difference between the basement depths in stages 1 and 3. For 78 structural cells, shortening is about 50 % on average (from 2–10 % to 67 %). An average modern depth of the basement top is 13 km (from 2.2 to 31.7 km). The amplitudes of uplifting and of the erosion of top of the sedimentary cover for large blocks are in a range from 9 to 19 km. Steady combinations of these values forming certain structures have been detected on the studied areas. It was found that the depth of the basement top in stage 3 (modern) has tendency to keep the value similar to the depth acquired in stage 1 (pre-folded) generally. This effect may be caused by an isostasy.. A number of estimated high values of the pair correlations have a genetic meaning. Using the factor analysis (as generalization of pairs correlations), we detected two factors related to the geodynamic mechanisms leading to formation of the structures larger than the cells – of the crust, and the upper mantle. Factor F1 (shortening, 60 % weight) depends on the amount of shortening and is responsible for amplitudes of uplifting. Factor F2 (isostasy, 27 % weight) is related to the initial thickness of the cover; it is responsible for the stability of the depth of the basement top. Isostasy assumes significant changes in the density of rocks in the crust and mantle, including the obtaining of mantle density volumes by the large volumes of the crust rocks. The factor “isostasy” in such kind was not taken into account in geodynamic models earlier.

Key words: Greater Caucasus; folding; balanced section; restoration of folded structure; value of shortening; geodynamic process; factor analysis; isostasy

RESEARCH ARTICLE

Recommended by S.I. Sherman

Received: December 27, 2016

Revised: June 14, 2017

Accepted: July 12, 2017

For citation: Yakovlev F.L., Gorbatov E.S., 2017. The first experience in diagnosing the geodynamic mechanisms of folding by the factor analysis of folded structure parameters (Greater Caucasus). *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 999–1019. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0329.

Для цитирования: Яковлев Ф.Л., Горбатов Е.С. Первый опыт диагностики геодинамических механизмов формирования складчатой структуры с помощью факторного анализа ее параметров (Большой Кавказ) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 999–1019. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0329.

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ДИАГНОСТИКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ЕЕ ПАРАМЕТРОВ (БОЛЬШОЙ КАВКАЗ)

Ф. Л. Яковлев, Е. С. Горбатов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация: В статье поставлена задача выявления реально действовавших в природе геодинамических механизмов формирования крупных блоков земной коры. Особенностью подхода является использование статистического анализа данных, получаемых с помощью методов тектонофизики и структурной геологии. Материалом для исследования послужили 24 детальных структурных профиля Большого Кавказа общей длиной около 500 км. Общая мощность мезокайнозойского осадочного чехла, смятого в интенсивные складки в олигоцене и раннем миоцене, составляет 10–15 км. При использовании метода «геометрии складчатых доменов» для трех стадий развития (1 – доскладчатая, 2 – постскладчатая, 3 – современная посторогенная) была реконструирована структура, сбалансированная по величинам деформации и объемам осадков. Для этого в профилях были выделены 505 «структурных доменов», которые после восстановления их доскладчатого состояния были объединены в 78 «структурных ячеек». В операциях реконструкции использовались замеры ряда структурных признаков в складках, образующих «складчатые домены». Для всех «структурных ячеек» были определены шесть параметров: величина сокращения, доскладчатая, постскладчатая и современная глубина кровли фундамента, расчетное положение размытой кровли чехла (амплитуда орогенного поднятия) и разница глубин фундамента между стадиями 1 и 3. Величина сокращения для 78 «ячеек» составила в среднем около 50 %, с разбросом от 2–10 до 67 %. Современная глубина кровли фундамента имела среднее значение –13 км (от –2.2 до –31.7 км); амплитуды поднятия и размыва кровли чехла для крупных блоков составили от 9 до 19 км. Были выявлены устойчивые сочетания этих значений по площади, формирующие определенные структуры. Определено, что кровля фундамента на стадии 3 (современной) в целом стремится сохранить глубину, приобретенную на стадии 1 (доскладчатой), что можно связывать с действием изостазии. Был определен ряд высоких значений парных корреляций, имеющих генетический смысл. Для обобщения парных корреляций использовался факторный анализ, который выявил два фактора, связанных с геодинамическими механизмами формирования структур, более крупных, чем «ячейки», – земной коры и верхней мантии. Фактор F1 (процесс «сокращения», вес 60 %) зависит от величины сокращения и отвечает за амплитуду поднятия, F2 (процесс «изостазии», вес 27 %) связан с исходной мощностью чехла, отвечает за устойчивость положения глубины кровли фундамента. «Изостазия» предполагает существенные изменения плотности пород коры и мантии, в том числе с приобретением больших объемов пород коры мантийных плотностей. В таком виде фактор «изостазия» в геодинамических моделях ранее не учитывался.

Ключевые слова: Большой Кавказ; складчатость; сбалансированный профиль; восстановление складчатой структуры; величина сокращения; геодинамический процесс; факторный анализ; изостазия

1. ВВЕДЕНИЕ

Выявление механизмов формирования тектонических структур разных масштабов – основная задача нескольких направлений науки – тектонофизики, геотектоники и геодинамики. Особая роль принадлежит здесь тектонофизике, которая исследует набор не самых крупных объектов – разрывов и пликтивных структур. При решении конкретных задач тектонофизики всегда предварительно решаются два вопроса: а) выделение объекта исследования путем проведения его границ; б) подбор методов описания его свойств и способов диагностики механизма формирования. Примерами таких

задач могут быть исследования полей напряжения в целях описания механизмов формирования разрывов, в том числе – при землетрясениях [Rebetsky, Marinin, 2006; Seminskii, 2008; Sim, 1982; Sherman, 1984; Sherman et al., 2012; Sainot, Angelier, 2002], определение поля напряжений на крыльях простых крупных складок с целью диагностики складок продольного и поперечного изгиба в Байджансайском антиклинории [Gzovsky, 1963].

Методы тектонофизики для изучения сложных и крупных складчато-разрывных структур с неясным генезисом используются нечасто, и соответственно для таких структур обычно нет однозначных решений проблемы механизма их формирова-

ния. Например, для Большого Кавказа С.А. Дотдугев [Dotduyev, 1987] предложил схему А-субдукции, для которой в соответствии с положениями тектоники плит допускаются величины сокращения пространства от 200 до 900 км. В.Н. Шолпо [Sholpo, 1978], напротив, объяснял морфологию и историю формирования складчатости альпийского Большого Кавказа с позиций гипотезы «метаморфогенной адвекции» без использования сокращения. Общее число других моделей Кавказа, описывающих его строение и развитие или касающихся проблем генезиса, превышает полтора десятка [Giorgobiani, Zakaraya, 1989; Timoshkina et al., 2010; Sholpo et al., 1993; Mosar et al., 2010; Trifonov, Sokolov, 2014; и др.]. Заметим, что совокупность основных умозрительных моделей Большого Кавказа существует в почти неизменном виде в течение последних 30–40 лет. В методическом отношении такие модели создавались как конкретная интерпретация структуры Кавказа в свете общих теоретических, геодинамических схем; они не могут быть достоверно доказаны или опровергнуты в рамках этой методологии. Использование тектонофизических подходов, а именно выявления нескольких иерархических уровней структур и определения для объектов каждого уровня величины и типа их деформаций (кинематики), может дать корректное решение проблемы расшифровки строения и генезиса некоторых типов крупных объектов в масштабе осадочного чехла складчатых сооружений [Yakovlev, 2008a, 2012a, 2012b, 2015a].

В моделях формирования крупных структур в масштабе коры и тектоносферы, т.е. в моделях объектов, исследуемых скорее геодинамикой, чем тектонофизикой, стали широко использоваться расчеты методом конечных элементов (например [Kastelic, Carafa, 2012; Cloetingh et al., 2013]), что, конечно, повышает их достоверность. Однако на этом пути перед исследователями сразу встают две принципиальные проблемы – надо решить, какая схема внешних приложенных сил и внутренних массовых сил соответствует моделируемой природной структуре, и, кроме этого, необходимо выяснить, какие конечные деформации являются реалистичными, т.е. надо знать начальную и конечную конфигурацию объектов. В связи с этим одной из актуальных задач по развитию методов исследования в тектонике и геодинамике является сбор фактического материала, относящегося к строению и развитию структур такого масштаба. Анализ такого материала, если он будет собран, мог бы на статистическом уровне выявить закономерности, связанные с процессами их формирования.

В статье будут приведены данные о складчато-разрывной структуре альпийского Большого Кавказа, полученные в ходе построения сбалансиро-

ванной модели его осадочного чехла с использованием методов определения величины складчатого укорочения, которые можно отнести к тектонофизике [Yakovlev, 2015a]. Главной целью статьи является статистический анализ этих данных, который позволяет сделать предварительные выводы о необходимом и достаточном наборе процессов, действовавших в ходе формирования складчатости и горного сооружения. Предполагается, что именно этот набор процессов в дальнейшем следует использовать для создания реалистичных геодинамических моделей.

2. АЛЬПИЙСКИЙ БОЛЬШОЙ КАВКАЗ

Складчатая система Большого Кавказа принадлежит Альпийско-Гималайскому подвижному поясу, но входит в состав его обособленной линейно вытянутой части (Крым, Большой Балхан и Копет-Даг), которая находится между Скифской эпигерцинской плитой на севере и серией блоков океанической и континентальной коры Черного моря, Закавказского массива и бассейна Южного Каспия. К югу от Закавказского массива и блоков Черного и Каспийского морей расположены обычные альпийские дугообразные складчато-надвиговые структуры Понтида, Малого Кавказа, Талыша и Эльбурса.

Структуре и истории развития мегантиклинория Большого Кавказа посвящено большое число монографий и крупных статей [Milanovsky, Khain, 1963; Milanovsky, 1968; Sholpo, 1978; Dotduyev, 1987; Sholpo et al., 1993; Saintot et al., 2006; Leonov, 2007; Marinin, Rastsvetaev, 2008; Somin, 2011]. Основная альпийская структура внутри Большого Кавказа, имеющая интенсивную складчатость, вытянута относительно узкой полосой (50–65 км) в основном между двумя крупными долгоживущими разломами глубокого заложения – Пшекиш-Тырныаузским на севере и Рача-Лечхумским на юге (рис. 1). Вдоль простираения традиционно выделяются четыре сектора [Sholpo, 1978], которые отличаются глубиной кровли фундамента, стратиграфическим уровнем пород, выходящих на поверхность, стилем деформаций и особенностями истории тектонического развития. Более дробными единицами являются структурно-фациальные или тектонические зоны, имеющие современную ширину от 5 до 25 км.

Осадочный чехол Большого Кавказа образован отложениями с возрастом от нижней юры до эоцена общей мощностью до 10–15 км. Повсеместно нижняя часть чехла начинается с конгломератов синемюрского яруса, которые в центральной части бассейна выше по разрезу сменяются толщами бескарбонатных (глубоководных) тонкозернистых

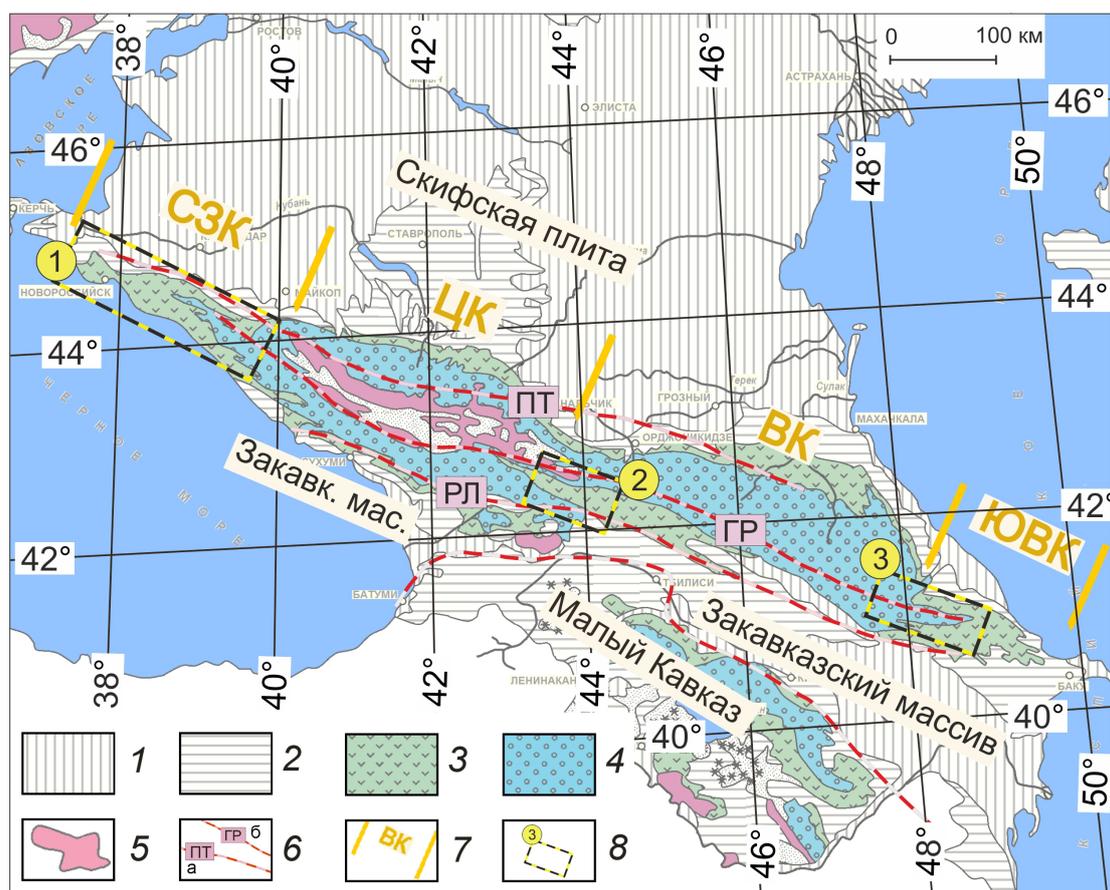


Рис. 1. Расположение исследованных районов на схеме геологического и тектонического строения Большого Кавказа (схематическая геологическая карта – по [Sukharev, Taranukha, 1979], с изменениями). Показаны Скифская плита, Закавказский массив, Малый Кавказ.

1–5 – отложения: 1 – четвертичные, 2 – неоген-палеогеновые, 3 – меловые, 4 – юрские, 5 – докембрийско-палеозойские; 6 – крупные разломы: а – границы сооружений (ПТ – Пшекиш-Тырныаузский разлом, РЛ – Рача-Лечхумский разлом), б – внутри Большого Кавказа (ГР – Главный Кавказский разлом); 7 – четыре сектора по [Sholpo, 1978]: СЗК – Северо-Западный Кавказ, ЦК – Центральный Кавказ, ВК – Восточный Кавказ, ЮВК – Юго-Восточный Кавказ; 8 – исследованные районы (1 – СЗК, 2 – Чиатурская зона, 3 – ЮВК: Шахдагская и Тфанская зоны).

Fig. 1. Locations of the studied areas in the schematic map of the geological and tectonic structure of Greater Caucasus (modified after the geological map in [Sukharev, Taranukha, 1979]). The map shows the Scythian plate, Transcaucasian Median Massif, and Lesser Caucasus.

1–5 – sediments: 1 – Quaternary, 2 – Neogene-Paleogene, 3 – Cretaceous, 4 – Jurassic, 5 – Precambrian – Paleozoic; 6 – major faults: а – structural boundaries (ПТ – Pshekish-Tyrnyauz Fault, РЛ – Racha-Lechkhumi Fault), б – in Greater Caucasus (ГР – Main Caucasian Fault); 7 – four sectors, according to [Sholpo, 1978]: СЗК – North-Western Caucasus, ЦК – Central Caucasus, ВК – Eastern Caucasus, ЮВК – South-Eastern Caucasus; 8 – studied areas (1 – СЗК, 2 – Chiatur tectonic zone, 3 – ЮВК: Shakhdag and Tfan tectonic zones).

глинистых сланцев, а также чередующимися сланцами и песчаниками нижней и средней юры общей мощностью 5–7 км.

Наиболее крупным разломом является Главный Кавказский разлом, вытянутый вдоль продольной оси всего Большого Кавказа (рис. 1), он разделяет его северную и южную части, имеющие разную историю тектонических движений начиная с поздней юры. В северных тектонических зонах (Шахдагская зона, Сланцевый Дагестан, Известняковый Дагестан) перед поздней юрой возникла относительно слабая складчатость, и здесь на размытых породах

накопились маломощные (1–2 км) мелководные субплатформенные карбонатные осадки. В конце альпийского орогенеза, после эоцена, все толщи здесь были смяты в крупные коробчатые складки. В южной части Большого Кавказа (Тфанская и Чиатурская зоны) начиная с поздней юры и до конца эоцена разрез без перерыва надстраивался флишевой карбонатно-терригенной толщей мощностью 6–8 км. В этих частях структуры общая мощность чехла достигает 15–18 км. После эоцена в этих зонах возникла интенсивная линейная складчатость общего смятия.

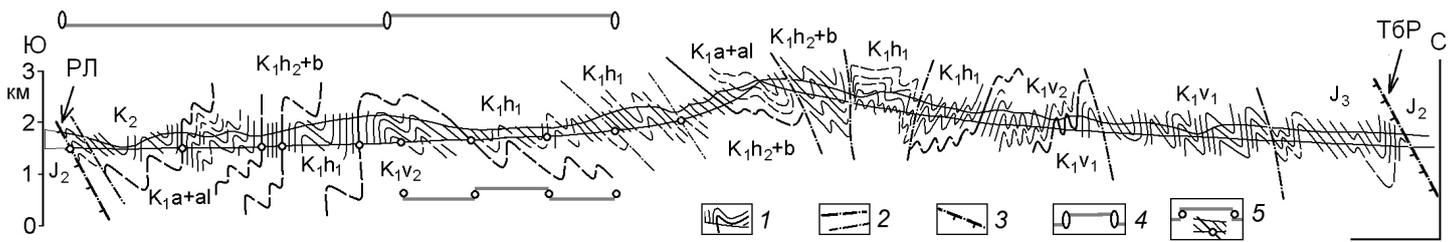


Рис. 2. Пример структурного разреза (профиль 12 «Кешельта», Чиаурская зона) и разбиение структуры на домены и структурные ячейки.

1 – слоистость и стратиграфические границы; 2 – разрывы крупные и среднего размера; 3 – разрывы на границах тектонических зон: РЛ – Рача-Лечхумский, Т6Р – Тибский надвиг; 4 – структурные ячейки и их границы; 5 – складчатые домены и их границы.

Fig. 2. Example of a structural section (profile 12 Keshelta in the Chiaur zone). Division of the structure into domains and structural cells.

1 – stratification and stratigraphic boundaries; 2 – large and medium-size faults; 3 – faults at the margins of tectonic zones: РЛ – Racha-Lechkhumi Fault, Т6Р – Tib thrust; 4 – structural cells and their boundaries; 5 – folded domains and their boundaries.

Время и продолжительность основной альпийской складчатости в пределах Большого Кавказа являются предметом дискуссии. На основании имеющихся угловых несогласий и перерывов в осадконакоплении многие исследователи [Milanovsky, Khain, 1963; Saintot et al., 2006, Trifonov, Sokolov, 2014; и др.] традиционно считают, что основная альпийская складчатость началась после эоцена и закончилась перед сарматом (средний миоцен). Этому периоду соответствует достаточно мощная толща тонкозернистой терригенной нижней молассы – майкопская серия. С сарматского века раннего миоцена повсеместно за пределами Большого Кавказа начали накапливаться осадки более грубые, с конгломератами, что свидетельствует о воздымании горного сооружения и появлении речной сети на больших пространствах высокой суши. Мощность верхней и нижней молассы в предгорных прогибах составляет обычно 2–3 км, а для их осевых частей – до 5–6 км. Во впадине Южного Каспия за последние 5 млн лет накопилось до 10 км осадков.

Складчатая структура Большого Кавказа изучена достаточно полно в результате специальных многолетних полевых работ нескольких групп исследователей [Sholpo, 1978; Sholpo et al., 1993; Rogozhin, Yakovlev, 1983; Yakovlev, 1997; Giorgobiani, Zakaraya, 1989]. Заметим, что обычные структурные разрезы, которые строятся по геологическим картам, не могут отразить структуру областей развития мелких складок (шириной от 0.5–2.0 км до 1–2 м) в тонких толщах большой мощности. Для исследования структуры таких регионов применяется метод сплошного сбора материала вдоль профиля с детальной зарисовкой структуры и измерениями всех геометрических параметров складок и разрывов.

Этот метод описан Е.А. Рогожиным [Sholpo et al., 1993, с. 8–10]. В результате проведения таких работ могут быть получены детальные структурные профили (в идеале – масштаба 1:10000) практически «фотографического» качества, которые пригодны для измерения непосредственно на них всех численных параметров структуры (рис. 2).

В пределах Большого Кавказа такой материал был собран и опубликован (см. рис. 1) для Юго-Восточного Кавказа (Шахдагская и Тфанская зоны; десять разрезов около 100 км общей длины, масштаб 1:10000 [Rogozhin, Yakovlev, 1983; Sholpo et al., 1993; Yakovlev, 1997]), для флиша Чиаурской зоны (три профиля масштаба 1:100000, общей длиной 70 км [Yakovlev, 1997]). По публикациям Т.В. Гиоргобiani [Giorgobiani, Zakaraya, 1989] и Е.А. Рогожина [Sholpo et al., 1993] для Северо-Западного Кавказа были отобраны 11 пересечений общей длиной около 350 км. Эти 24 профиля были использованы для реконструкции доскладчатых профилей и создания сбалансированной структуры чехла Большого Кавказа фактически в двух крупных общих пересечениях – в его западной и восточной частях.

3. МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ СБАЛАНСИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

Сбалансированность модели складчатой структуры означает, прежде всего, ее соответствие двум критериям: а) совпадению объема структуры (площади поперечного сечения в случае линейной складчатости) в доскладчатой и современной стадиях, б) непротиворечивости внутренней структуры на ее современной стадии в сравнении с доскладчатой. Эти критерии в целом аналогичны

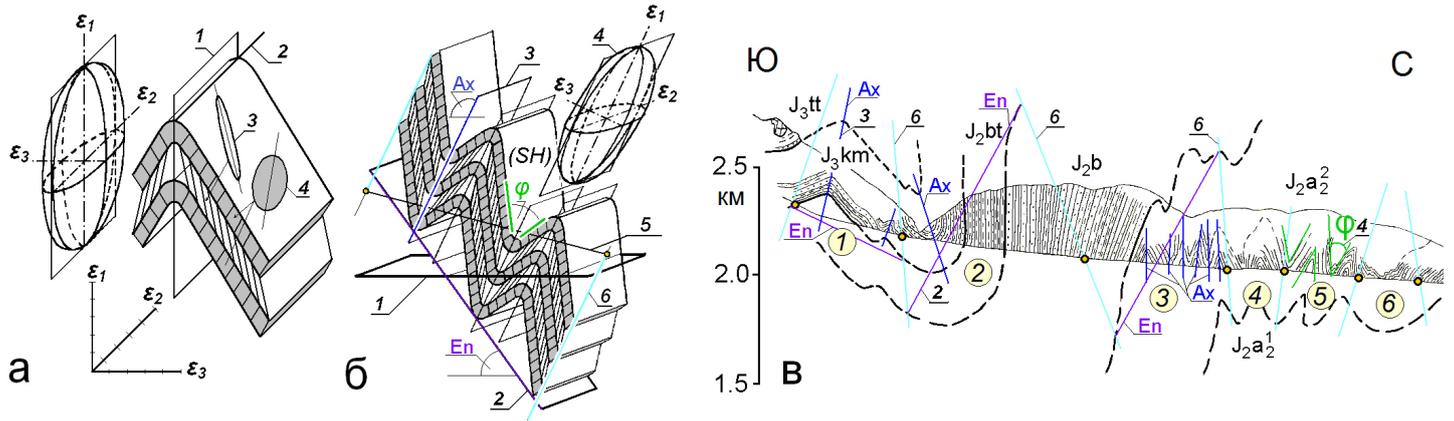


Рис. 3. Складчатый домен, положение эллипсоида деформаций в складке («а» и «б» по [Yakovlev, Voitenko, 2005]) и характер детального структурного материала.

а – модель складки пачек слоев, показывающая общую деформацию и эллипсы деформаций для компетентных и некомпетентных слоев. Оси эллипсоида для складки: удлинения ϵ_1 , промежуточная ϵ_2 , укорочения ϵ_3 . 1 – осевая поверхность складки; 2 – линия шарнира; 3 и 4 – эллипсы деформаций в некомпетентном (3) и в компетентном (4) слое. б – основные параметры домена как совокупности нескольких складок. 1 – плоскость горизонта; 2 – поверхность зеркала складок и угол ее падения En ; 3 – осевая плоскость и угол ее падения Ax ; 4 – эллипсоид деформаций, величина сокращения которого, SH , может быть измерена через угол схождения крыльев складки φ ($SH=(1-\cos(90-\varphi/2))\times 100\%$); 5 – часть линии профиля в границах домена, ее длина и угол падения; 6 – проведение границы домена на профиле (параллельно осевым плоскостям складок). в – характер структурного материала в детальном профиле (Тфанская зона, южная часть профиля 7). Показаны одна крупная и много мелких складок, выделено шесть доменов. В доменах показаны замеры параметров; обозначения 1–6 соответствуют рисунку «б».

Fig. 3. The folded domain; the position of the strain ellipsoid in the fold («а» and «б» after [Yakovlev, Voitenko, 2005]); the structural material in the detailed profile.

а – model of fold of a layers package, which shows the total strain and the strain ellipsoids for competent and incompetent layers. The axes of the ellipsoid for the fold: lengthening ϵ_1 , intermediate ϵ_2 , shortening ϵ_3 . 1 – axial surface of the fold; 2 – hinge line; 3, 4 – strain ellipsoids in the incompetent (3) and competent (4) layers. б – main parameters of the domain (i.e. a combination of several folds). 1 – horizon plane; 2 – surface of the envelope plane and its dip, En ; 3 – axial plane and its dip, Ax ; 4 – strain ellipsoid, which value of shortening, SH is measurable from the interlimb angle, φ ($SH=(1-\cos(90-\varphi/2))\times 100\%$); 5 – segment of the profile within the limits of the domain, its length and dip; 6 – domain's boundary in the profile (parallel to the axial planes of the folds). в – structural material in the detailed profile (Tfan zone, the southern segment of profile 7). One large fold and several small-size folds are shown. Six domains are distinguished. Measured parameters are given in the domains; symbols 1–6 are same as in Figure «б».

условиям сбалансированности структуры в обычных методах построения сбалансированных разрезов для предгорных прогибов [Prokopiev et al., 2004, с. 42]. Разумеется, соблюдение этих условий для восстановления структуры в сложных мультимасштабных комплексах полной линейной складчатости возможно только при корректном определении величины сокращения ее частей.

Для построения восстановленной (сбалансированной) доскладчатой и современной структуры был применен метод «геометрии складчатых доменов» [Yakovlev, 2009, 2012c, 2017], разработанный в рамках представлений о иерархии структур линейной складчатости, включающей в себя семь рангов [Yakovlev, 2008a]. В соответствии с этим, в структурном профиле выделялись «складчатые домены» (рис. 2, знак 5), в которых измерялись несколько параметров, сопоставляемых с эллипсоидом деформаций, вписанным в объем домена: наклон зеркала складок, наклон осевой поверхно-

сти складок, угол при вершине складок (рис. 3). Кроме того, измерялась длина и наклон отрезка линии профиля для домена, что необходимо для проведения операций восстановления структуры. Всего в профилях было выделено 505 доменов, каждый домен восстанавливался от современного до исходного доскладчатого состояния с помощью трех кинематических операций – поворота, простого сдвига и растяжения (рис. 4), что может быть выражено простыми уравнениями на основе геометрических соотношений измеряемых параметров [Yakovlev, 1987, 2009]. При наличии в структурном профиле разрыва на границе домена его наклон в современной структуре также измерялся и затем, в процессе восстановления, вычислялся наклон его плоскости и амплитуда смещения (рис. 4, знак 5). На следующем этапе построений все доскладчатые состояния доменов соединялись друг с другом с учетом разрывов (рис. 5) и в результате восстанавливалось доскладчатое состоя-

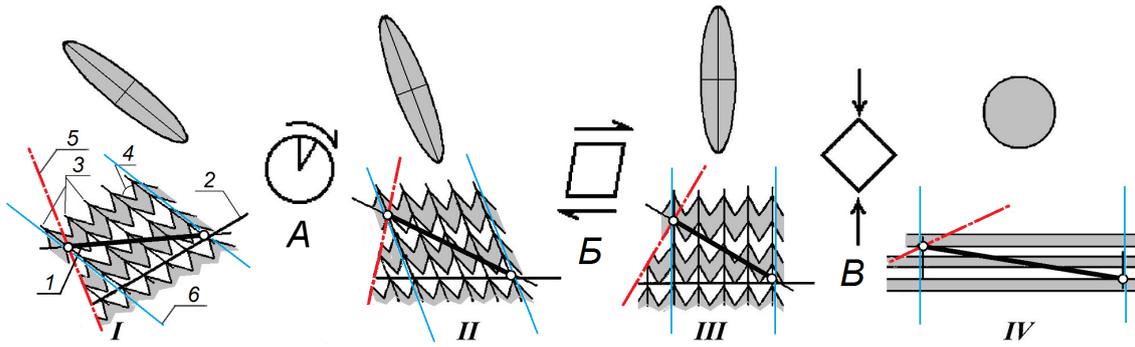


Рис. 4. Операции восстановления доскладчатого состояния домена, по [Yakovlev, 2008b], с добавлениями. Приведены символические изображения складчатой структуры домена (1–6) для состояний от современного (I) к доскладчатому (IV), изменения эллипса деформации и виды операций: А – поворот (от состояния I к состоянию II), Б – горизонтальный простой сдвиг (от II к III), В – растяжение (вертикальный чистый сдвиг, от III к IV).

1 – отрезок линии профиля; 2 – линия зеркала складок; 3 – осевые поверхности складок; 4 – угол схождения крыльев (соответствует коэффициенту сокращения складок); 5 – плоскость разрыва; 6 – границы домена вверх и вниз по слоистости.

Fig. 4. Reconstruction of the pre-folded state of the domain (modified after [Yakovlev, 2008b]). Changes in the folded structure of the domain (1–6) from the modern (I) to pre-folded (IV) state schematically, changes in the strain ellipsoid and types of operations are shown: A – rotation (from state I to state II), Б – simple horizontal shearing (from state II to state III), В – lengthening (pure vertical shearing, from state III to state IV).

1 – segment of the profile line; 2 – line of the envelope plane; 3 – axial surfaces of folds; 4 – interlimb angle (corresponds to the fold shortening coefficient); 5 – fault plane; 6 – boundaries of domain upward and downward across the stratification.

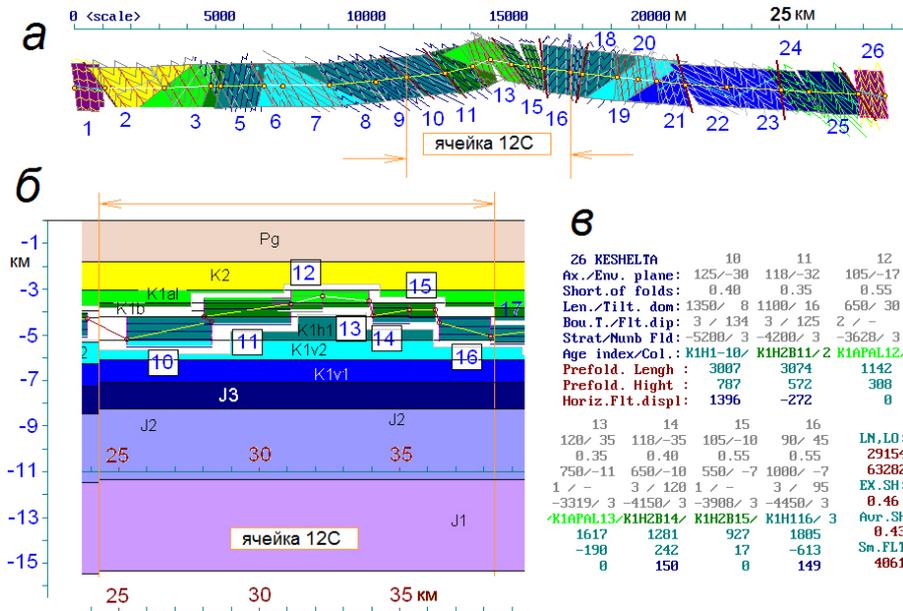


Рис. 5. Компильция профиля 12 (Чиатурская зона) из доменов (по [Yakovlev, 2015a], с изменениями).

а – полный современный профиль, построенный компьютерной программой по замерам в природной структуре; б – часть построенного доскладчатого профиля, для ячейки 12С (домены 10–16); в – таблица исходных данных: условные обозначения для таблицы – синие индексы слева вверху, им соответствуют серые цифры параметров для доменов 10–16; красные индексы слева и голубые цифры для доменов – расчетные данные длины отрезков профиля и вертикальное расстояние. Голубые индексы и красные цифры в конце таблицы справа – результат вычислений для всего профиля.

Fig. 5. Compilation of profile 12 (Chiaur zone) from the domains (modified after [Yakovlev, 2015a]).

а – complete modern profile constructed by the software based on measurements in cross-section of the natural structure; б – segment of the profile constructed for the pre-folded state of cell 12C (domains 10–16); в – table of the input data. Legend of the table: blue indices (top left) correspond to grey numbers for domains 10–16; red indices (left) and blue numbers for domains – calculated length of the profile's segments, and vertical distances. Blue indices and red numbers (right) – calculated values for the entire profile.

Т а б л и ц а 1. Вычисление амплитуды неотектонического поднятия для ячеек профиля 12 «Кешельта»

Table 1. Calculation of neotectonic uplift amplitudes for the structural cells on profile 12 Keshelta

Ячейка	Мощность чехла, ст. 1	Высота рельефа	Стратиграф. глубина, ст. 1	Сокращ., К	Стратиграф. глубина, ст. 2	Амплитуда поднятия	Мощность чехла, ст. 2	Глубина кровли фундамента, ст. 3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
12 А	-15475	1730	-4400	0.54	-8147	9877	-28657	-18780
12 В	-15475	1987	-5121	0.42	-12194	14181	-36845	-22664
12 С	-15350	2739	-4042	0.41	-9859	12598	-37439	-24841
12 D	-15300	2348	-5745	0.52	-11048	13396	-29423	-16027
12 E	-15300	1944	-7384	0.51	-14478	16422	-30000	-13578

ние всего профиля. При сопоставлении его длины в доскладчатом и современном состоянии легко определяется величина общего сокращения.

Однако более интересно иметь величины деформаций частей структуры, по возможности наименьшего размера. Было установлено, что такими структурами могут выступать «структурные ячейки», ширина которых в доскладчатом состоянии сопоставима с мощностью всего осадочного чехла (см. рис. 2, знак 4; рис. 5, б). Такие структуры в идеале представляют собой полуволну крупных складок, в терминологии М.А. Гончарова [Goncharov, 1979] – «структурные ячейки», в которых может проявляться «механизм адвекции» – разновидность конвекции. Дальнейшие шаги алгоритма построения сбалансированной структуры начинаются со сбора данных о полной мощности разреза. По результатам предварительного восстановления структуры домены объединяются в ячейки; например, ячейка «12С» на рис. 5 состоит из доменов с номерами от 10 до 16. Для каждой ячейки по литературным и другим доступным данным определяется мощность осадочного чехла (табл. 1, колонка 2), в результате чего создается «стратиграфическая модель» ячейки – все слои и стратиграфические границы получают свою глубину. Затем проводится окончательное балансирование профиля, имеющее основной целью подобрать такие параметры смещения по разрывам, которые дают совпадения всех глубин стратиграфических границ внутри каждой ячейки в соответствии с ее стратиграфической моделью. Вслед за этим следующей операцией является определение величины сокращения для каждой ячейки (табл. 1, колонка 5); так, ячейка «12С» имеет длину 14276 и 5872 м, сокращение для нее составило 0.41 (59 %).

Далее по имеющимся цифровым данным доменов определяется несколько важных параметров. Для ячейки «12С» домены (рис. 5, в), а точнее – точки линии профиля внутри доменов, имеют стратиграфические глубины от -5200 м (подошва готерива) до -3320 м (альб), средняя глубина составила

-4042 м. На основании представления о последовательности главных событий истории развития (осадконакопление, складчатость, горообразование) и для удобства вычислений считалось, что на стадии складчатости и сокращения кровля структуры не поднималась. Соответственно средняя глубина линии профиля для ячейки «12С» при сокращении должна была увеличиться и составить $-9859 \text{ м} = -4042 \text{ м} / 0.41$. Тогда подошва всего чехла увеличивает глубину с -15350 до -37439 м. Для всех доменов легко определяется высота рельефа линии профиля. Для ячейки «12С» она менялась от 2252 м до 3068 м и составила в среднем 2739 м. Это означает, что на стадии неотектонического поднятия на эту высоту попали точки профиля со средней глубины -9859 м. Условные преобразования структуры в виде трех стадий показаны на рис. 6 для всех пяти ячеек профиля 12 Чиаурской зоны. Из этих данных легко вычисляется амплитуда поднятия на третьей, неотектонической, стадии ($12598 \text{ м} = 2739 - (-9859)$). Знание величины поднятия позволяет вычислить современную глубину кровли фундамента или подошвы чехла; для ячейки «12С» она составила $-24841 \text{ м} = (-37439 \text{ м} + 12598 \text{ м})$. Важным параметром оказалось также общее смещение глубины кровли фундамента от стадии 1 (конец осадконакопления) до современной стадии 3. Для ячейки «12С» оно составило $-9.5 \text{ км} (-9.49 \text{ км} = -24.84 \text{ км} - (-15.35 \text{ км}))$.

Указанные параметры составляют основной массив данных для построения сбалансированных трехстадийных моделей альпийского чехла Большого Кавказа. Приведенная выше методика в полном виде, включая объяснения теоретических основ и примеры вычислений, описана в специальной публикации [Yakovlev, 2017].

4. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ СБАЛАНСИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ БОЛЬШОГО КАВКАЗА

Результаты построения модели альпийского осадочного чехла удобно представить для восточ-

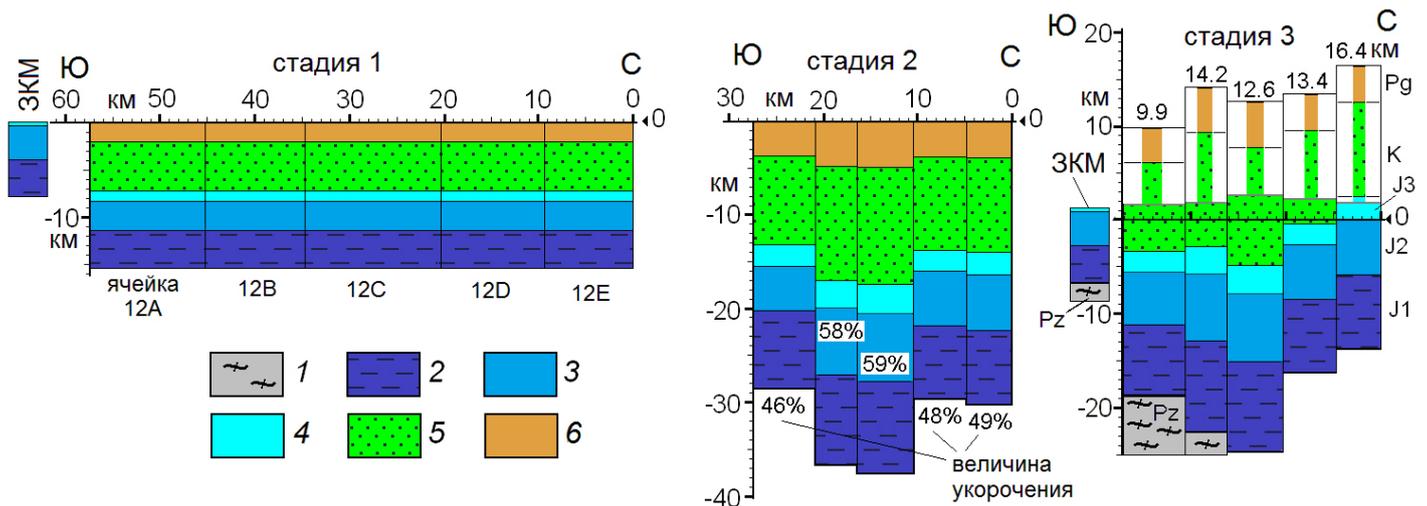


Рис. 6. Определение амплитуды «неотектонического поднятия» на примере профиля 12 Чиаурской зоны (по [Yakovlev, 2012c], с изменениями).

ЗКМ – Закавказский срединный массив. Показаны расстояния и глубины в километрах, позиции границ основных стратиграфических подразделений, величины сокращения (на стадии 2), позиции виртуальной кровли осадочного чехла (стадия 3, цифры). Три профиля показывают три условные (технические) стадии развития структуры: 1 – постседиментационная доскладчатая (доолигоценовая), 2 – постскладчатая доорогенная (на начало сармата), 3 – посторогенная (современная) стадия. 1 – палеозойский фундамент; 2 – нижняя юра; 3 – средняя юра; 4 – верхняя юра; 5 – меловые отложения; 6 – палеоцен и эоцен.

Fig. 6. Calculated amplitudes of the ‘neotectonic uplift’ in case of profile 12 (Chiaur zone) (modified after [Yakovlev, 2012c]).

ЗКМ – Transcaucasian Median Massif. Distances and depths are given in kilometers; the boundaries of the main stratigraphic units, shortening values (stage 2), positions of the virtual top of the sedimentary cover (stage 3, numbers) are shown. Three profiles show three conventional (technical) stages in the development of the structure: 1 – post-sedimentary pre-folded (pre-Oligocene), 2 – post-folded pre-orogenic (for the beginning of Sarmatian age), 3 – post-orogenic (modern) stages. 1 – Paleozoic basement; 2 – Lower Jurassic; 3 – Middle Jurassic; 4 – Upper Jurassic; 5 – Cretaceous deposits; 6 – Paleocene and Eocene.

ной части Кавказа и для Северо-Западного Кавказа по отдельности.

Восточная часть Большого Кавказа была изучена в Чиаурской зоне (см. рис. 1, ареал 2) на юге структуры и севернее, на Юго-Восточном Кавказе в Тфанской и Шахдагской зонах (см. рис. 1, ареал 3). В 36 ячейках было определено (с юга на север), что величины укорочения для них менялись от 37 до 67 % со средними значениями 57, 55 и 49 % (табл. 2), при доскладчатой ширине зон в 57, 24 и 32 км, соответственно. Исходная глубина кровли фундамента на стадии 1 составляла в среднем для этих же зон с юга на север –15.3, –13.4 и –9.8 км. Расчетная глубина фундамента для стадии 3 (современная) после складчатости и неотектонического поднятия составляет в среднем –20.5 км (–13.6...–26.3), –12.0 км (–4.4...–19.4) и –10.2 км (–7.6...–13.7). Для Тфанской и Шахдагской зон наблюдается достаточно закономерное и устойчивое по простиранию распределение этих значений (рис. 7) со значительным (≈ 10 км) относительным погружением южной части Тфанской зоны по крупному разлому (профили 6–10). Расчетная высота кровли осадочного чехла в масштабе структурных ячеек (поднятия и размыва его верхней части) составила для

Чиаурской, Тфанской и Шахдагской зон в среднем 16.1 км (9.9–22.2), 19.2 км (12.2–24.4) и 9.6 км (7.2–12.5).

По расчетам в 42 структурных ячейках Северо-Западного Кавказа (использованы 250 доменов) их величины укорочения составили от 2–10 % (на западе региона наблюдалось растяжение до –10 %) до 67 % при среднем значении 35 %. Доскладчатая ширина всего бассейна осадконакопления здесь достигала 100–120 км при современной полной ширине структуры 50–65 км. Для конца доскладчатой стадии глубина кровли фундамента здесь варьировалась от –7.3 до –17.3 км при среднем значении –13.4 км. Современное положение кровли фундамента (стадия 3) меняется от –2.2 до –31.7 км при средней величине –13.2 км. Высота поднятия и размыва верхней части осадочного чехла в масштабе структурных ячеек для Северо-Западного Кавказа менялась от 0 до 22.2 км при среднем значении 8.9 км.

По материалам сбалансированных структурных пересечений восточной части Большого Кавказа, которые по объему занимали весь осадочный слой, удалось построить принципиальный структурный разрез на следующем масштабном уровне – для

Т а б л и ц а 2. Параметры структурных ячеек для Юго-Восточного Кавказа и Чиаурской зоны (выборочно). Показаны результаты для Шахдагской зоны (профиль 1), Тфанской зоны (3, 6, 8) и Чиаурской зоны (12) (по [Yakovlev, 2012c, 2015a], с изменениями)

Table 2. Parameters of the structural cells for the South-Eastern Caucasus and the Chiaur zone (selected). The results for the Shakhdag (profile 1), Tfan (profiles 3, 6, and 8), and Chiaur (profile 12) zones are shown (modified after [Yakovlev, 2012c, 2015a])

Индексация ячеек	Величина сокращения, Sh, %	Глубина кровли фундамента, стадия 1, км	Глубина кровли фундамента, стадия 3, км	Неотектоническое поднятие (разница глубин на стадиях 2 и 3)	Разница глубин кровли фундамента (стадии 1–3)
1	2	3	4	5	6
1 А	38	-9.8	-8.6	7.2	+1.2
1 В	49	-9.8	-7.8	11.2	+2.0
1 С	37	-9.8	-7.6	7.9	+2.2
3 А	51	-11.9	-10.3	14.5	+1.6
3 В	67	-11.9	-17.4	18.7	-5.5
3 С	44	-11.9	-9.7	11.6	+2.2
6 А	40	-11.9	-7.6	12.2	+4.3
6 В	58	-16.7	-15.2	24.4	+1.5
6 С	59	-16.7	-17.7	22.9	-1.0
8 А	36	-15.5	-8.7	15.5	+6.8
8 В	62	-15.5	-18.2	22.6	-2.7
12 А	49	-15.3	-13.6	16.4	+1.7
12 В	48	-15.3	-16.0	13.4	-0.7
12 С	59	-15.4	-24.8	12.6	-9.5
12 D	58	-15.5	-22.7	14.2	-7.2
12 E	46	-15.5	-18.8	9.9	-3.3

всей земной коры [Yakovlev, 2012c; 2015a] (рис. 8). Схема строилась на предположении, что повсеместное накопление базальных конгломератов в начале юры определяет исходную мощность земной коры в 40 км. После накопления осадочного чехла (рис. 8, а), а также после формирования складчатости и горообразования породы бывшей границы Мохо должны были оказаться на глубине до 100–110 км (рис. 8, б), что не совпадает с положением современной границы Мохо (50–55 км). Из этого построения следует вывод о том, что оба процесса – формирование складчатости и горообразование – могли быть реализованы только при условии, если заметная часть (до 50–60 %) объема пород коры (гранулитобазитового и даже гранитогнейсового слоя) приобретет плотность пород мантийных [Yakovlev, 2012c, 2015a].

Рассмотрим коротко, насколько сильно и каким образом отличаются полученные данные по основным параметрам от наиболее полярных умозрительных моделей Большого Кавказа – аккреционной [Dotduyev, 1987] и адвективной [Sholpo, 1978]. По величине укорочения структуры (≈50 %) сбалансированная модель занимает промежуточное положение между 5-кратным (80 %) сокращением и отсутствием сокращения (0 %). Расчетная глубина сбалансированной модели от 8 до 25 км при средней величине 13–15 км может считаться заметно большей, чем в обеих указанных схемах.

Точно так же данные сбалансированной модели о размыве верхней части чехла в 10–20 км воспринимаются как ненормально большие относительно этих двух схем. В сбалансированной модели фундамент испытал сокращение, в обеих умозрительных моделях он жесткий (в аккреционной – испытывает пододвигание). Таким образом, ни одно из важных свойств ни одной из этих двух моделей не подтвердилось. Другие имеющиеся модели не сильно отличаются по своим свойствам от рассмотренных двух крайних вариантов, если эти свойства в них как-то были представлены. Это означает, что существующие геодинамические схемы Большого Кавказа несовершенны и необходимо разработать геодинамическую модель, более близкую к параметрам природных структур.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

Одна из сложных проблем современной геодинамики состоит в том, что для одной и той же структуры могут быть предложены одновременно несколько моделей, использующих разные механизмы или источники энергии всех процессов. Эти модели обычно не опираются на конкретные структурные данные и интерпретируют только один или несколько параметров, игнорируя остальные. Методология, направленная на количествен-

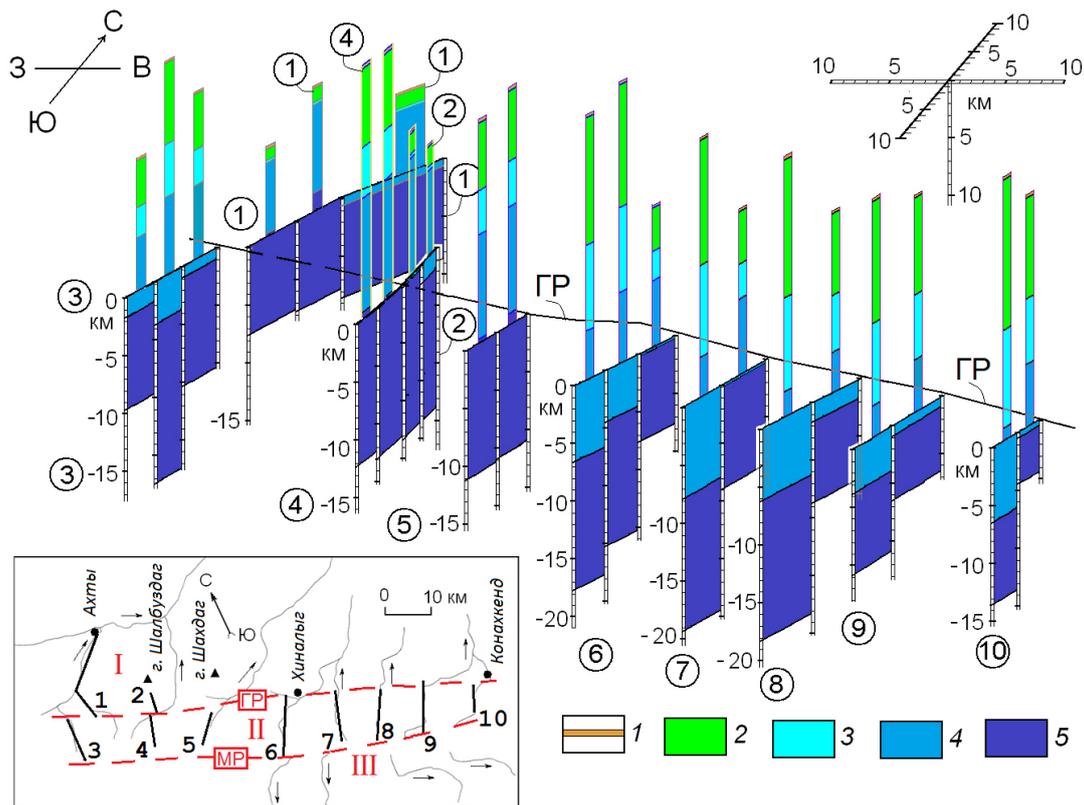


Рис. 7. Квазитрехмерная модель современной структуры Юго-Восточного Кавказа в аксонометрической проекции (по [Yakovlev, 2015b], с изменениями). Размытая структура до виртуальной кровли чехла для структурных ячеек показана столбиками. ГР – Главный Кавказский разлом. На врезке показана схема расположения профилей и расположение тектонических зон. Профили 1 и 2 принадлежат Шахдагской зоне (I), 3–10 – Тфанской зоне (II); южнее Малкамудского надвига (МР) находится аналог Чиаурской зоны – Ковдагская зона (III). 1 – палеоген; 2 – мел; 3 – верхняя юра; 4 – средняя юра; 5 – нижняя юра.

Fig. 7. Quasi-three-dimensional model of the modern structure of South-Eastern Caucasus in the axonometric projection (modified after [Yakovlev, 2015b]). Columns show the eroded structure of the virtual top of the sedimentary cover for the structural cells. ГР – Main Caucasian Fault. The locations of the profiles and tectonic zones are shown in the inset schematic map. Profiles: 1, 2 – Shakhdag zone (I), 3–10 – Tfan zone (II). The Kovdag zone (III), which is an analogue of the Chiaur zone, is located southward of the Malkamood thrust (MP). 1 – Paleogene; 2 – Cretaceous; 3 – Upper Jurassic; 4 – Middle Jurassic; 5 – Lower Jurassic.

ное сравнение таких геодинамических моделей с природными структурами с целью определения степени их достоверности, также не разработана. Ниже предлагается проводить поиск механизмов формирования структуры не общепринятым, дедуктивным, интерпретационным путем, а индуктивным, опираясь при этом на комбинацию измеренных природных параметров конкретных структур.

На предварительных стадиях исследования складчатой структуры Большого Кавказа [Yakovlev, 2008c, 2009, 2012c, 2015a] было установлено для двух его частей по отдельности, что значения глубины кровли фундамента перед складкообразованием (стадия 1) и современные (стадия 3) его глубины для структурных ячеек оказались близки. Выразалось это, в частности, в том, что средняя

разница глубин фундамента на стадиях 1 и 3 для структурных профилей Северо-Западного Кавказа оказалась близка к нулю как в целом по региону (табл. 3), так и для каждого профиля. В то же время вкрест простирания этот параметр имел весьма значительные отклонения от нуля, до -14.6 и $+7.5$ км, с определенными закономерностями распределения по площади региона (рис. 9). Было сделано предположение о том, что за этим фактом стоит явление изостазии, направленное на удержание границы осадочного чехла и фундамента на одном глубинном уровне в процессе формирования структуры [Yakovlev, 2012c, 2015a]. Были обнаружены также высокие корреляции ряда параметров структуры [Yakovlev, 2008c]. Стало понятно, что результаты построения сбалансированной структуры могут рассматриваться как природный наблюдае-

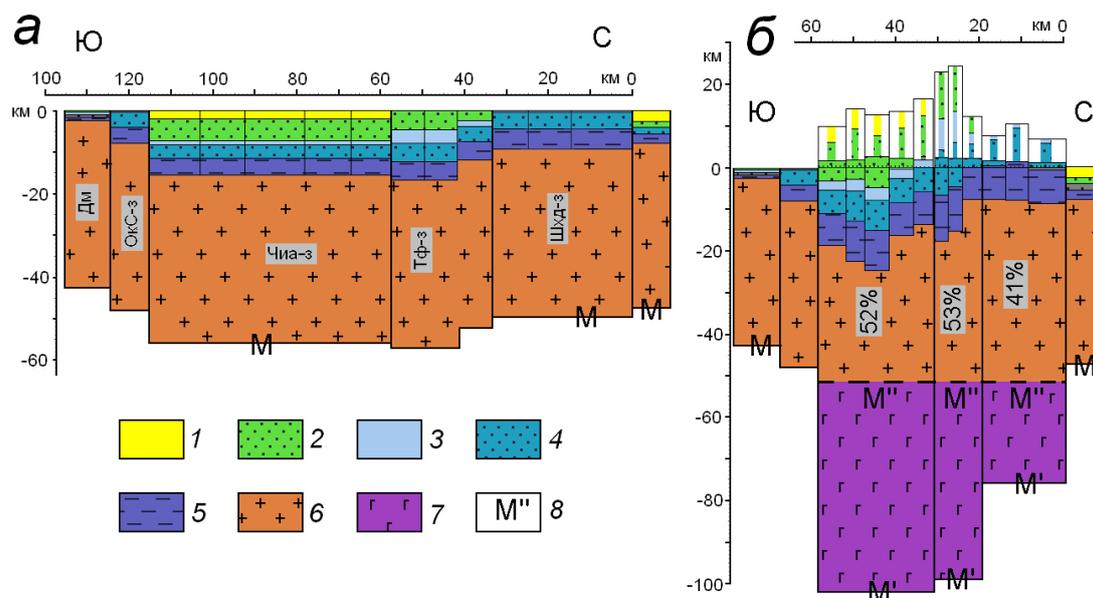


Рис. 8. Принципиальная гипотетическая схема развития и глубинного строения восточной части Большого Кавказа в масштабе земной коры в свете данных о величинах альпийской складчато-разрывной деформации (по [Yakovlev, 2012c, 2015b], с изменениями). а – в конце этапа осадконакопления перед основной складчатостью; б – на современном этапе после укорочения и горообразования. Показаны обобщенные величины сокращения тектонических зон в процентах (для Чиаурской – Чиа-з, Тфанской – Тф-з и Шахдагской Шхд-з зон) и размывы объемов осадочного чехла. Закавказский массив: Дм – Дзирульский массив, ОкС-з – Окрибо-Сачхерская зона.

1 – палеоцен и эоцен; 2 – мел; 3 – верхняя юра; 4 – средняя юра; 5 – нижняя юра; 6 – объемы кристаллической части земной коры до поверхности Мохо (для а – на момент начала осадконакопления); 7 – предполагаемые объемы мантийного вещества, образованные из пород погруженной части земной коры; 8 – граница Мохо: М – граница Мохо из расчета толщины коры 40 км на начало юры, М' – положение пород, занимавших позицию границы Мохо первоначально (для а), М'' – предполагаемое положение современной новообразованной границы Мохо.

Fig. 8. Principal hypothetical scheme showing the development and the deep structure of the eastern region of Greater Caucasus in the scale of the crust, according to the amounts of the Alpine folding-faulting deformation (modified after [Yakovlev, 2012c, 2015b]). а – at the end of the sedimentation stage, before the main folding; б – at the modern stage, after shortening and mountain building. The total values of shortening of the tectonic zones are shown in percentage (for the zones: Чиа-з – Chiaur, Тф-з – Tfan, Шхд-з – Shakhdag) and the eroded volumes of the sedimentary cover. Transcaucasian Massif: Дм – Dzirula massif, ОкС-з – Okribo-Sachkhera zone.

1 – Paleocene and Eocene; 2 – Cretaceous; 3 – Upper Jurassic; 4 – Middle Jurassic; 5 – Lower Jurassic; 6 – volumes of the crystalline part of crust down to Moho (а – at the beginning of sedimentation); 7 – assumed volumes of the mantle material originating from the subsided crustal rocks; 8 – Moho: М – Moho estimated from the crust thickness of 40 km at the beginning of the Jurassic, М' – position of the rocks that initially held the Moho position (а), М'' – assumed position of the modern newly formed Moho.

Т а б л и ц а 3. Средние значения глубин кровли фундамента и величин неотектонического поднятия для трех стадий развития Северо-Западного Кавказа (42 ячейки) и трех зон восточной части Большого Кавказа (36 ячеек) (по [Yakovlev, 2015a])

Table 3. Average values of the depths to the basement top and the neotectonic uplift amplitudes at three stages in the development of the North-Western Caucasus (42 cells) and of three zones of the Eastern Greater Caucasus (36 cells) (after [Yakovlev, 2015 a])

	Величина укорочения, %	Доскладчатая глубина, км	Постскладчатая глубина, км	Современная глубина, км	Неотектоническое поднятие, км	Разница глубин, км
Северо-Западный Кавказ	35	-13.38	-22.2	-13.25	8.9	0.13
Юго-Восточный Кавказ и Чиаурская зона	55	-13.60	-31.7	-15.10	16.6	-1.5

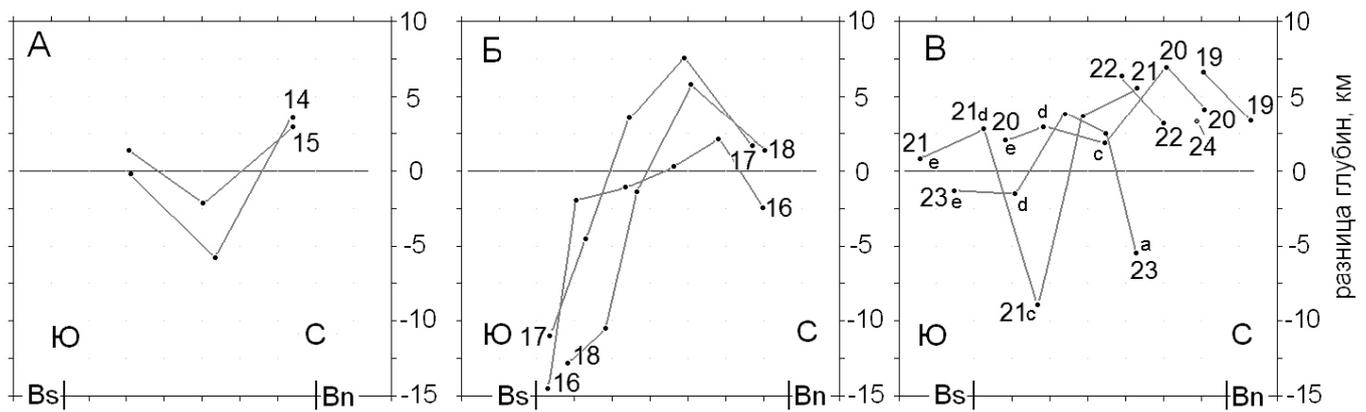


Рис. 9. Характер распределения параметра «разница глубин фундамента» в структурных ячейках Северо-Западного Кавказа вкрест простирания структуры; север справа; расстояния по горизонтальной оси условные; двумя вертикальными штрихами на горизонтальных осях диаграмм показаны южная (Bs) и северная (Bn) границы основной структуры мегантиклинория [Yakovlev, 2015b]. А – западный сегмент структуры, профили 14 и 15, наблюдается центральный прогиб; Б – центральный сегмент, профили 16, 17, 18, виден резкий наклон структуры к югу; В – восточный сегмент, профили 19–24, намечается центральный прогиб с максимумом погружения в ячейках 20с, 21с, 23а.

Fig. 9. Distribution of the 'basement depth difference' parameter in the structural cells of North-Western Caucasus across the strike of the structure. The North of profile is on the right side; the distances on the horizontal axis are conditional; two vertical lines on horizontal axis of diagrams are marking southern (Bs) and northern (Bn) boundaries of main structure of mega-anticlinorium [Yakovlev, 2015b]. А – western segment of the structure, profiles 14 and 15, the central trough is observed; Б – central segment, profiles 16, 17, and 18, the structure is sharply inclined southwards; В – eastern segment, profiles 19–24, the central trough is marked by maximum subsidence in cells 20c, 21c, and 23 a.

мый материал, с которым можно сравнивать параметры теоретических геодинамических моделей с целью их проверки, а также для выявления самих процессов формирования структуры.

Для реализации такого подхода сначала следует провести стандартный статистический анализ материала с целью раскрытия возможных генетических связей параметров.

В качестве анализируемых характеристик для 78 структурных ячеек были определены шесть параметров, имеющие нижеследующие обозначения: (1) начальная или доскладчатая мощность осадочного чехла, она же – глубина кровли фундамента (h_1), для стадии 1; (2) величина укорочения коры ($Sh=(L_0-L)/L_0, \%$) для стадии 2; (3) постскладчатая глубина кровли фундамента (ГКФ) ($h_2=h_1 \times (L_0/L)$) для стадии 2; (4) современная, для стадии 3, ГКФ (h_3); (5) неотектоническое поднятие (h_3-h_2); (6) общая разница ГКФ (h_3-h_1). Параметры различались по свойству «измеренный/вычисленный», для исключения из анализа корреляций между параметрами «вычисленный/вычисленный», которые указывают лишь на формульные зависимости и не имеют прямого отношения к природному процессу.

Для первичного выявления генетических связей между параметрами были вычислены линейные коэффициенты корреляции (табл. 4). На рис. 10 приведены некоторые диаграммы рассеяния, соответствующие этим корреляциям и показывающие

зависимости между парами параметров с высокими (А, Б) и умеренными (В, Г) коэффициентами корреляции. Вытянутость ареалов точек на диаграммах рассеяния «А и Б» (рис. 10) велика, по сравнению с графиками «В и Г», что указывает на значительную силу связей между этими параметрами. Если учитывать время «возникновения» того или иного параметра, то можно установить их причинно-следственные связи. Так, легко устанавливается зависимость амплитуды неотектонического поднятия (5) на стадии 3 от величины укорочения структуры (2), возникшего на стадии 2, что отражено в высоком коэффициенте корреляции ($R=0.818$) и большой вытянутости ареала (табл. 4, рис. 10, А).

В найденных корреляциях, если их рассматривать по отдельности, есть одна существенная неопределенность: любая из этих корреляций может отражать совокупные закономерности, связанные с действием, по меньшей мере, двух процессов – складкообразования и горообразования. Для разделения таких сложных отношений может быть использован факторный анализ.

Факторный анализ нашел широкое применение в исследованиях сложных, многопараметрических геологических объектов. Для адекватного описания таких объектов требуется сокращение большого количества коррелирующих между собой параметров и сведение их к небольшому числу независимых переменных (факторов) с сохранением

Т а б л и ц а 4. Матрица корреляций параметров структурных ячеек (N=78). Пояснения в тексте

Table 4. Parameter correlation matrix for the structural cells (N=78). See explanations in the text

Параметры		Коэффициенты корреляции						
		(1) h1*	(2) Sh*	(3) h2	(4) h3	(5) h3-h2*	(6) h3-h1	
1	исходная мощность (ГКФ)	h1*	1	-0.023	0.565	0.708	-0.126	0.379
2	укорочение	Sh*		1	-0.783	-0.361	0.818	-0.461
3	ГКФ, стадия 2	h2			1	0.759	-0.737	0.685
4	ГКФ, стадия 3	h3				1	-0.119	0.922
5	амплитуды поднятия	h3-h2*					1	-0.087
6	разница ГКФ (3-1)	h3-h1						1

П р и м е ч а н и е. Полу жирным шрифтом выделены корреляции с $p < 0.05$ при $N=78$ (превышающие доверительные границы нулевой гипотезы, т.е. эти корреляции являются неслучайными, значимыми). * - параметры, непосредственно полученные из сбалансированной модели (измеренные); физический смысл имеют корреляции между параметрами «измеренными / измеренными», «измеренными / вычисленными». Зачеркнуты корреляции между параметрами «вычисленные / вычисленные», не имеющие физического смысла.

N o t e. Boldface font - correlations with $p < 0.05$ ($N=78$) (in excess of the confidence limits of the null hypothesis, i.e. these correlations are nonrandom and considerable). * - parameters derived directly from the balanced model (measured); the correlations between the 'measured/measured', 'measured/calculated' parameters are physically meaningful. Crossed out are the correlations between the 'calculated/calculated' parameters, which have no physical meaning.

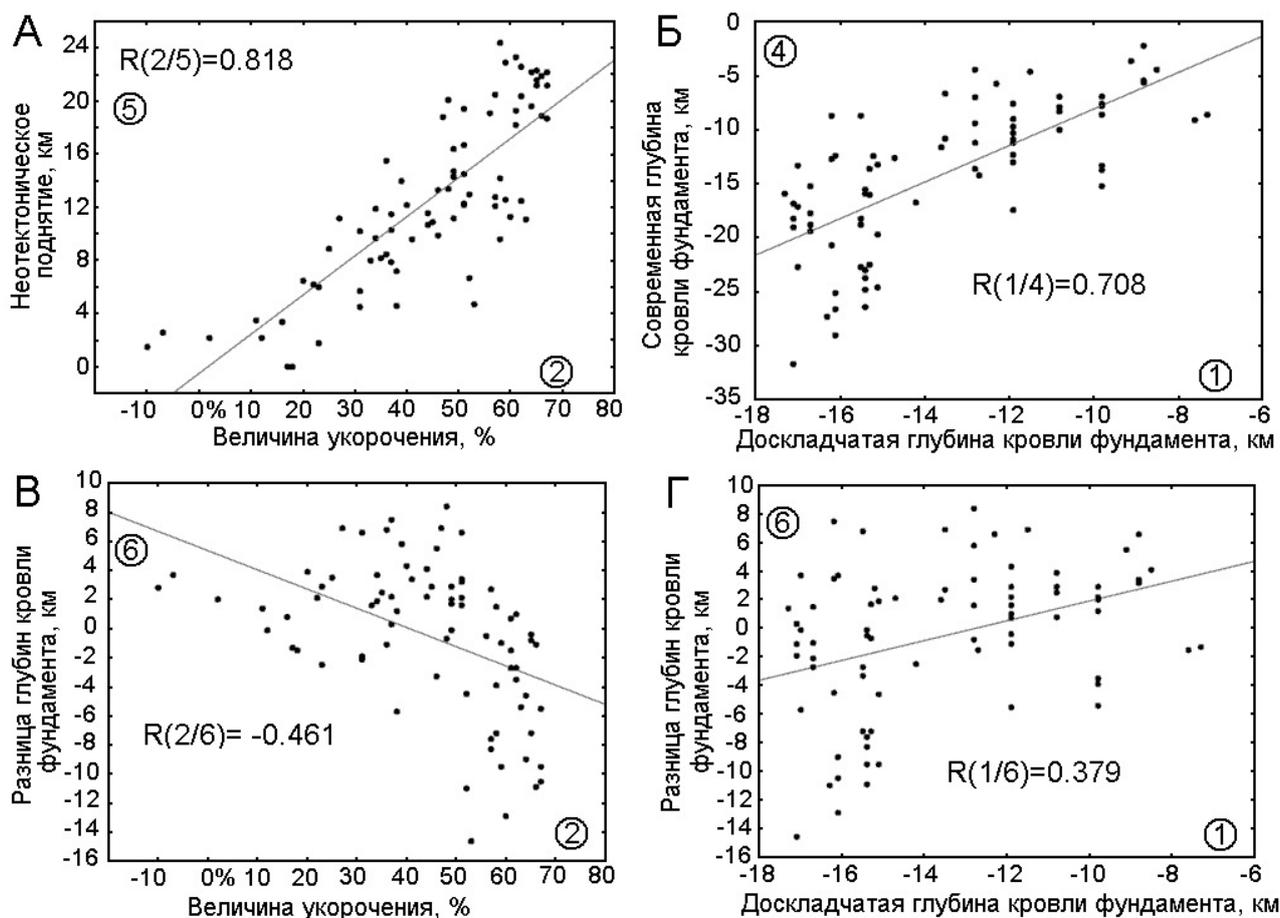


Рис. 10. Диаграммы рассеяния для ряда параметров. Указаны парные коэффициенты корреляции R. Прямой линией показаны графики линейной регрессии, аппроксимирующие зависимость параметра Y от X.

Fig. 10. Diagrams showing the scatter of several parameters. The pair coefficients of correlation, R are indicated. The straight line shows the linear regression curves approximating the relationship between parameters Y and X.

Т а б л и ц а 5. Факторные нагрузки параметров

T a b l e 5. Factor loads of the parameters

Параметры		Факторные нагрузки		
		F1	F2	
1	исходная мощность (ГКФ)	h1*	0.022	0.790
2	укорочение	Sh*	0.938	-0.195
3	ГКФ, стадия 2	h2	-0.736	0.665
4	ГКФ, стадия 3	h3	-0.158	0.982
5	амплитуды поднятия	h3-h2*	0.957	0.050
6	разница ГКФ (3-1)	h3-h1	-0.219	0.853
Вес факторов, %			60	27

П р и м е ч а н и е. Полужирным шрифтом выделены высокие нагрузки (>0.7). ГКФ – глубина кровли фундамента.

N o t e: Boldface font – high load (>0.7). ГКФ – depth to the basement top.

при этом всей информативности. Методы факторного анализа позволяют это сделать. Таким образом, факторный анализ необходим не только для более четкого выявления причинно-следственных взаимосвязей исходной совокупности параметров изучаемых геологических объектов, но и для решения генетических вопросов и выявления скрытых механизмов. В нашем случае за факторами могут стоять какие-то, пока неизвестные, процессы формирования складчатой и орогенной структуры.

Методы факторного анализа широко применяются в геологии при изучении эволюции природных систем в пространстве и во времени, построении корреляционных моделей и моделей изменчивости геохимических систем, анализе временных рядов параметров с целью выделения нескольких периодических процессов и т.п. [Belonin et al., 1982].

Для разделения геодинамических процессов был применен факторный анализ массива данных [Lawley, Maxwell, 1963]. При использовании статистической программы «Statistica» с этой целью было проведено последовательное выделение факторов (новых переменных) методом «Varimax», основанным на вращении пространства исходных переменных, максимизирующем дисперсию [Gorbatov, Yakovlev, 2016]. В результате было выделено два фактора (F1, F2), объясняющих соответственно 60 % и 27 % общей дисперсии массива данных (табл. 5). Суммарная объясненная дисперсия достигает 87 %, что указывает на высокую степень соответствия выбранной двухфакторной модели исходным данным.

По исходным параметрам структурных ячеек были рассчитаны нагрузки (корреляции) факторов (табл. 5). Из приведенной таблицы видно, что F1 имеет высокие нагрузки по следующим признакам: величина укорочения (2) 0.938 и амплитуда перемещения кровли фундамента при горообразовании (5) 0.957; нагрузка по признаку (3) «глубина кров-

ли после складчатости» также является большой, -0.736, но она объясняется формулой вычисления признака (произведение первого и второго признаков); F2 – доскладчатая (1) 0.790 и современная глубина кровли фундамента (4) 0.982 и их разность (6) 0.853. Последний параметр вычисляется по первым двум, поэтому он не является самостоятельным. Эти связи хорошо видны также на диаграмме рассеяния величин нагрузок по обоим факторам (рис. 11). Видно, что сила связей для нагрузок по признакам 2 (Sh) и 5 (h3-h2) обеспечивает один процесс (горизонтальная синяя стрелка, рис. 11), для признаков 1 (h1) и 6 (h3-h1) – другой (вертикальная синяя стрелка, рис. 11). С признаками 3 (h2) и 4 (h3) сложнее: здесь рост фактора 1 (укорочение) обеспечивает погружение структуры в соответствии с формулой (смещение по рыжей стрелке влево, рис. 11) на первом этапе, но следующий этап приводит к ее поднятию (смещение по рыжей стрелке вправо). На основании этих данных может быть дана следующая генетическая 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 глубины кровли фундамента в результате последовательного и/или совместного действия процессов складчатости и горообразования.

Таким образом, исследование параметров сбалансированной структуры с помощью факторного

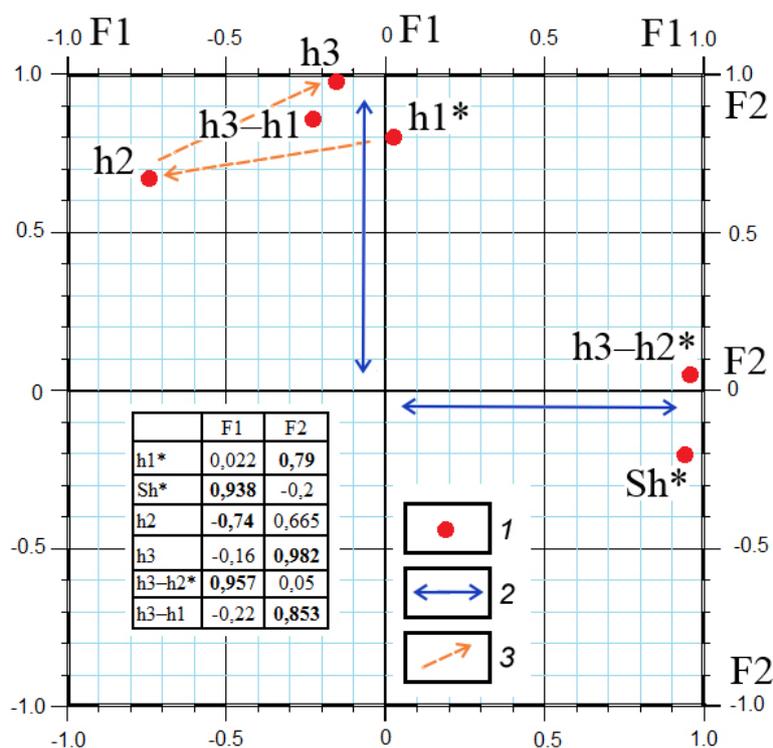


Рис. 11. Диаграмма распределения параметров структурных ячеек в поле двух факторов, показывающая силу и характер связи между ними.

1 – положение параметра; 2 – сила связи группы параметров как расстояние от «0» координат, где корреляция между параметрами отсутствует; 3 – связи трех положений глубины кровли фундамента на стадии 1 (h1), доскладчатой; стадии 2 (h2), после сокращения и складчатости, и стадии 3 (h3), современной, после горообразования, согласно принятой модели развития: связь (h1) и (h2) имеет вычислительный характер, связанный с сокращением, (h3) и (h2) связаны величиной неотектонического поднятия (h3-h2).

Fig. 11. Distribution of the parameters of the structural cells in the field of two factors. The diagram illustrates the relationships between the parameters.

1 – parameter position; 2 – strength of the relationship in the group of parameters, which is estimated as a distance from coordinate 0 (i.e. a lack of correlation between the parameters); 3 – relationships between three positions of depth of a basement top at the 1st stage (h1), pre-folded; the 2nd stage (h2), after shortening and a folding formation, and the 3d stage (h3), modern, after mountain building, according to the accepted development model: relationship (h1) and (h2) has the computing character related with shortening, (h3) and (h2) are related by the value of a neotectonic uplifting (h3-h2).

анализа позволило выявить статистическим, объективным образом факт участия в формировании структуры Большого Кавказа двух процессов геодинамического характера (не одного и не трех), что объясняет до 87 % изменчивости полученного материала.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Материал статьи делится на две смысловые части. В первой показано, как на основе тектонофизической методологии была восстановлена доскладчатая структура чехла, определены величины сокращения для относительно крупных блоков («структурных ячеек») и получены расчетные прогнозы некоторых важных параметров, включая современную глубину кровли фундамента. Во второй

части эти полученные расчетные параметры 78 структурных ячеек используются уже в качестве исходных данных для исследований статистического характера, которые позволили выявить участие геодинамических механизмов «сокращения пространства» и «изостазии» в формировании этой структуры Большого Кавказа.

Методы исследования механизмов формирования складчатых структур до настоящего времени не получили широкого распространения, поэтому в начале статьи коротко объясняется метод составления сбалансированных разрезов в объектах линейной складчатости хинтерланда [Yakovlev, 2009, 2015a], который сильно отличается от методов составления стандартных сбалансированных разрезов в предгорных прогибах [Prokopiev et al., 2004]. Важно, что этот материал в процессе вычислений никак не связывался с какими-либо априорно за-

данными геодинамическими гипотезами, но, напротив, является продуктом прямых замеров параметров природной структуры. Поскольку в данной статье основное внимание уделяется выявлению механизмов формирования крупных структур (предмет второй части статьи), то обсуждение результатов будет касаться только характера механизмов формирования объектов складчатости разного масштаба и вопросов соотношения тектонофизических и геодинамических подходов в этих исследованиях.

Тектонофизика как часть геодинамики традиционно играет важную роль в проверке на реалистичность выдвигаемых гипотез, касающихся механизмов формирования пликативных (складчатых) и разрывных структур. Привлечение для описания явлений в складчатых структурах физически корректных моделей позволяет решать некоторые задачи тектоники [Yakovlev, 2015a, с. 160, 196, 207]. В отличие от разрывов самого разного масштаба, объекты, испытывающие большие деформации (складки), имеют самые разные механизмы в зависимости от размера: от «растворения под давлением» зерен кварца и кальцита для внутрислойных объектов до «субдукции» и появления комплексов «дайка в дайке» для частей ячеек мантийной конвекции. В связи с этим исследования линейной складчатости Большого Кавказа опирались на иерархическую систему семи уровней [Yakovlev, 1997, 2015a], в рамках которой использованные в статье «домены» и «структурные ячейки» являются объектами III и IV уровня. Использование условных механизмов поворота, простого сдвига, чистого сдвига, которые были ядром метода восстановления доскладчатого положения доменов, следует отнести к тектонофизической методологии. Механизмы формирования структур в масштабах осадочного чехла («структурные ячейки», IV уровень, и «тектонические зоны», V уровень) могут моделироваться на эквивалентных материалах или в виде кинематических вычислительных моделей [Yakovlev, 2015a, с. 340, 362], т.е. при анализе таких структур также используются тектонофизические подходы.

Найденные параметры «структурных ячеек», как выяснилось при статистических исследованиях, связаны с механизмами формирования еще более крупных структур, охватывающих всю кору и верхнюю мантию; это объекты, по меньшей мере, VI уровня. Особенностью таких механизмов, как «сокращение пространства» и «изостазия», будет, кроме того, охват ими по времени нескольких разнородных этапов развития блоков коры и мантии, от погружения и накопления осадков до горообразования. Такие «механизмы» можно рассматривать как уже выходящие за рамки тектонофизики, как

механизмы геодинамические, поскольку в них не используются понятия полей напряжений, деформаций и эквивалентного моделирования.

При рассмотрении характера выявленных механизмов «сокращения пространства» и «изостазии» надо учитывать, что их обнаружение в статистически значимом материале было сделано впервые и что они представляют собой, прежде всего, совокупность «необходимых и достаточных» механизмов, описывающих формирование крупных структур. Это означает также, что нахождение двух «факторов» или «механизмов» не является гипотезой, каких ранее разными исследователями выдвигалось много, а относится к наблюдаемому факту, поэтому подробное описание природы факторов, их соотношения во времени и их генетического соподчинения на данном этапе не может быть сделано; это следует считать задачами будущих исследований. Из того, в чем можно быть уверенным уже сейчас, следует упомянуть в качестве доказанного факта существенное изменение плотности пород коры и верхней мантии на всех трех этапах формирования структуры Большого Кавказа, что является физическим выражением «механизма изостазии». Выявление распределения таких изменений по вертикальному разрезу литосферы, определение пределов изменения плотности пород и их приуроченность к нескольким этапам развития – также одна из задач будущих исследований. Вполне очевидное, на первый взгляд, представление о внешнем сжатии как об источнике «сокращения пространства» в условиях заметного увеличения плотности пород коры и мантии может оказаться не единственно возможным. Здесь можно предположить, что соответствующее активное погружение ставших относительно более тяжелыми крупных блоков коры в основании Большого Кавказа может приводить к пассивному сближению окружающих его стабильных блоков Скифской плиты и Закавказского массива. Значительный интерес вызывает существенная сила связи параметра «h2» (глубина кровли фундамента на стадии 2) с обоими факторами: его нагрузки составили для F1=-0.736, для F2=0.665. Возможно, здесь могут быть найдены следы генетической связи указанных двух механизмов.

Полученные выше данные, а именно: 1) совокупность наблюдаемых натуральных параметров 78 структурных ячеек, 2) описание двух факторов или механизмов – «сокращения пространства» и «изостазии» – в качестве необходимого и достаточного количества управляющих параметров, позволяют перейти к постановке задачи создания расчетной модели развития Большого Кавказа с использованием метода конечных элементов. Можно утверждать, что любые другие модели этой структуры в

масштабе коры и верхней мантии, использующие какой-либо один механизм (внешнее сжатие прежде всего) или набор других механизмов, не будут соответствовать природным процессам. Заметим, что в предлагаемой постановке задачи такая модель впервые может быть проверена путем сравнения результатов ее расчетов с параметрами массива природных данных.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистическое исследование параметров сбалансированной модели осадочного чехла Большого Кавказа выявило ряд важных парных корреляционных связей, которые имеют геодинамический смысл. Использование факторного анализа показало наличие двух относительно независимых процессов (факторов), связанных с величиной сокращения пространства (F1, табл. 5) и с изостатическим выравниванием структуры по глубине кровли фундамента (F2).

Какой-либо один геодинамический процесс из известных явлений не может быть основой геодинамической модели, адекватно и полно описывающей формирование природной складчатой структуры. Такая модель должна включать в себя действие, по крайней мере, двух процессов, находящихся в определенной пространственно-временной связи.

Для выявления необходимой и достаточной совокупности геодинамических процессов и тестирования в дальнейшем сложных моделей формирования складчато-надвиговых структур в масштабах осадочного чехла и земной коры необходимо иметь статистически значимый фактический материал, включающий в себя параметры, прямо относящиеся к структуре и истории развития крупных регионов.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят организаторов Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2016 г., на которой исследование было впервые представлено и получило диплом I степени. Авторы признательны сотрудникам лаборатории палеосейсмологии и палеогеодинамики А.М. Корженкову, А.А. Варданян, А.А. Сорокину, И.Р. Стаховскому и Р.Ю. Стаховской за плодотворное обсуждение данной статьи на семинаре в декабре 2016 г. Авторы искренне благодарны рецензенту, проф. Семену Ийновичу Шерману за существенные замечания к первоначальной версии работы. В результате устранения неточностей был усилен принципиальный акцент на анализе геодинамических механизмов формирования крупных структур в масштабах всей коры, что заметно улучшило статью.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Belonin M.D., Golubeva V.A., Skublov G.T., 1982. Factorial Analysis in Geology. Nedra, Moscow, 269 p. (in Russian) [Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М.: Недра, 1982. 269 с.]
- Cloetingh S., Burov E., Francois T., 2013. Thermo-mechanical controls on intra-plate deformation and the role of plume-folding interactions in continental topography. *Gondwana Research* 24 (3–4), 815–837. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.012>.
- Dotduyev S.I., 1987. Nappe structure of the Greater Caucasus Range. *Geotectonics* 20, 420–430.
- Giorgobiani T.V., Zakaraya D.P., 1989. The Folded Structure of the North-Western Caucasus and the Mechanism of Its Formation. Metsniereba, Tbilissi, Georgia, 60 p. (in Russian) [Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. Тбилиси: Мецниереба, 1989. 60 с.]
- Goncharov M.A., 1979. Density Inversion in Earth's Crust and Folding Formation. Nedra, Moscow, 246 p. (in Russian) [Гончаров М.А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. М.: Недра, 1979. 246 с.]
- Gorbatov E.S., Yakovlev F.L., 2016. The study of geodynamic development of a structure of Greater Caucasus by methods of multidimensional statistics. In: The scientific conference of young scientists and graduate students of IPE RAS. Theses of reports and program of the Conference (Moscow, April 25–26, 2016). IPE RAS, Moscow, p. 27 (in Russian) [Горбатов Е.С. Яковлев Ф.Л. Изучение геодинамического развития сооружения Большого Кавказа методами многомерной статистики // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа конференции (Москва, 25–26 апреля 2016 г.). М.: ИФЗ РАН, 2016. С. 27]. Available from: <http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/gorbatov-yak-16.pdf>.
- Gzovsky M.V., 1963. The Main Issues of Tectonophysics and Tectonics of Baydzhansaysky Anticlinorium. Parts III and IV. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 544 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. III, IV. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 544 с.]
- Kastelic V., Carafa M.M.C., 2012. Fault slip rates for the active External Dinarides thrust-and-fold belt. *Tectonics* 31 (3), TC3019. <https://doi.org/10.1029/2011TC003022>.

- Lawley D.N., Maxwell A.E., 1963. Factor Analysis as a Statistical Method. Butterworths, London, 117 p. [Русский перевод: Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. М.: Мир, 1967. 144 с.].
- Leonov Yu.G. (Ed.), 2007. The Greater Caucasus in the Alpine Epoch. GEOS, Moscow, 368 p. (in Russian) [Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Ред. Ю.Г. Леонов. М.: ГЕОС, 2007. 368 с.]
- Marinin A.V., Rastsvetaev L.M., 2008. Tectonic structures of the North-West Caucasus. In: Yu.L. Rebetsky (Ed.), Tectonophysics and actual problem of Earth sciences. 40th anniversary of the foundation of Tectonophysics Laboratory. Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, p. 191–224 (in Russian) [Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН / Ред. Ю.Л. Ребецкий. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 191–224].
- Milanovsky E.E., 1968. Neotectonics of the Caucasus. Nedra, Moscow, 483 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.].
- Milanovsky E.E., Khain V.E., 1963. Geological Structure of Caucasus. MSU Publishing House, Moscow, 357 p. (in Russian) [Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. М.: Изд-во МГУ, 1963. 357 с.].
- Mosar J., Kangarli T., Bochud M., Brunet M.-F., Glasmacher U.A., Rast A., Sosson M., 2010. Cenozoic – Recent tectonics and uplift in the Greater Caucasus: a perspective from Azerbaijan. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R.A. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (Eds.), Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian platform. Geological Society, London, Special Publications, vol. 340, p. 261–280. <https://doi.org/10.1144/SP340.12>.
- Prokopyev A.V., Fridovsky V.Yu., Gayduk V.V., 2004. Faults (Morphology, Geometry and Kinematics). Textbook. Yakutian Filial of SB RAS Publishing House, Yakutsk, 148 p. (in Russian) [Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы (морфология, геометрия и кинематика): Учебное пособие. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. 148 с.].
- Rebetsky Yu.L., Marinin A.V., 2006. Preseismic stress field before the Sumatra-Andaman earthquake of 26.12.2004: a model of metastable state of rocks. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 47 (11), 1173–1185.
- Rogozhin Ye.A., Yakovlev F.L., 1983. A quantitative estimate of the morphology of folding in the Tfan Zone of the Greater Caucasus. *Geotektonika (Geotectonics)* (3), 87–98 (in Russian) [Рогожин Е.А., Яковлев Ф.Л. Опыт количественной оценки морфологии складчатости Тфанской зоны Большого Кавказа // Геотектоника. 1983. № 3. С. 87–98].
- Saintot A., Angelier J., 2002. Tectonic paleostress fields and structural evolution of the NW-Caucasus fold-and-thrust belt from Late Cretaceous to Quaternary. *Tectonophysics* 357 (1–4), 1–31. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00360-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00360-8).
- Saintot A., Stephenson R., Brunet M.-F., Sébrier M., Yakovlev F., Ershov A., Chalot-Prat F., McCann T., 2006. The Mesozoic–Cenozoic Tectonic Evolution of the Greater Caucasus. In: D.G. Gee, R.A. Stephenson (Eds.), European lithosphere dynamics. Geological Society, London, Memoirs, vol. 32, p. 277–289. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.16>.
- Seminskii K.Zh., 2008. Hierarchy in the zone-block lithospheric structure of Central and Eastern Asia. *Russian Geology and Geophysics* 49 (10), 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.017>.
- Sherman S.I., 1984. The physical experiment in the tectonics and the similarity theory. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (3), 8–18 (in Russian) [Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 8–18].
- Sherman S.I., Lysak S.V., Gorbunova E.A., 2012. A tectonophysical model of the Baikal seismic zone: Testing and implications for medium-term earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics* 53 (4), 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.03.003>.
- Sholpo V.N., 1978. The Alpine Geodynamics of the Greater Caucasus. Nedra, Moscow, 176 p. (in Russian) [Шолпо В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра, 1978. 176 с.].
- Sholpo V.N., Rogozhin E.A., Goncharov M.A., 1993. The Folding of the Great Caucasus. Nedra, Moscow, 192 p. (in Russian) [Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192 с.].
- Sim L.A., 1982. Determination of the regional field from the data on local stresses on separate sites. *Izvestiya vuzov. Geologiya i Razvedka (Geology and Exploration)* (4), 35–40 (in Russian) [Сим Л.А. Определение регионального поля по данным о локальных напряжениях на отдельных участках // Известия вузов. Геология и разведка. 1982. № 4. С. 35–40].
- Somin M.L., 2011. Pre-Jurassic basement of the Greater Caucasus: brief overview. *Turkish Journal of Earth Sciences* 20 (5), 545–610. <https://doi.org/10.3906/yer-1008-6>.
- Sukharev G.M., Taranukha Yu.K., 1979. Mineral deposits of the Caucasus. Nedra, Moscow, 176 p. (in Russian) [Сухарев Г.М., Тарануха Ю.К. Полезные ископаемые Кавказа. М.: Недра, 1979. 176 с.].
- Timoshkina E.P., Mikhailov V.O., Leonov Y.G., 2010. Formation of the Orogen-Foredeep System: A Geodynamic Model and Comparison with the Data of the Northern Forecaucasus. *Geotectonics* 44 (5), 371–387. <https://doi.org/10.1134/S0016852110050018>.
- Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., 2014. Late Cenozoic tectonic uplift producing mountain building in comparison with mantle structure in the Alpine-Himalayan belt. *International Journal of Geosciences* 5 (5), 497–518. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.55047>.

- Yakovlev F.L., 1987. A study of the kinematic of linear folding (on the example of the South-Eastern Caucasus). *Geotektonika (Geotectonics)* (4), 31–48 (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Исследование кинематики линейной складчатости (на примере Юго-Восточного Кавказа) // *Геотектоника*. 1987. № 4. С. 31–48].
- Yakovlev F.L., 1997. The recognition of linear folding mechanisms based on quantitative attributes of its morphology (on the Greater Caucasus example). Preprint. UIPE RAS, Moscow, 76 p. (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа). Препринт. М.: ОИФЗ РАН, 1997. 76 с.]. Available from: <http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/yak-book-97.pdf>.
- Yakovlev F.L., 2008a. Multirank strain analysis of linear folded structures. *Doklady Earth Sciences* 422 (7), 1056–1061. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08070118>.
- Yakovlev F.L., 2008b. Vladimir Vladimirovich Belousov and the problem of folding formation. *Geofizicheskiye Issledovaniya (Geophysical Researches)* 9 (1), 56–75 (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости // *Геофизические исследования*. 2008. Т. 9. № 1. С. 56–75].
- Yakovlev F.L., 2008c. The study of post-folding mountain building – first results and approaches to mechanisms diagnostics on the North-West Caucasus example. In: Common and regional problems of tectonics and geodynamic. The materials of XLI Tectonic meeting. GEOS, Moscow, vol. 2, p. 510–515 (in Russian) [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 XLI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2008с. Т. 2. С. 510–515].
- Yakovlev F.L., 2009. Reconstruction of linear fold structures with the use of volume balancing. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45 (11), 1025–1036. <https://doi.org/10.1134/S1069351309110111>.
- Yakovlev F.L., 2012a. Identification of geodynamic setting and of folding formation mechanisms using of strain ellipsoid concept for multi-scale structures of Greater Caucasus. *Tectonophysics* 581, 93–113. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.004>.
- Yakovlev F.L., 2012b. Methods for detecting formation mechanisms and determining a final strain value for different scales of folded structures. *Comptes Rendus Geoscience* 344 (3–4), 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.02.005>.
- Yakovlev F.L., 2012c. Reconstruction of the balanced structure of the eastern part of alpine Greater Caucasus using data from quantitative analysis of linear folding – case study. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. (1), 191–214 (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Опыт построения сбалансированной структуры восточной части альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // *Вестник КРАУНЦ, серия Науки о Земле*. 2012. № 1. С. 191–214].
- Yakovlev F.L., 2015a. Multirank Strain Analysis of Linear Folding on the Example of the Alpine Greater Caucasus. Doctoral thesis. IPE RAS, Moscow, 472 p. (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Многогранговый деформационный анализ линейной складчатости на примере альпийского Большого Кавказа: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИФЗ РАН, 2015. 472 с.]. Available from: http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/Yakovlev-doct_diss_2015-russ-full.pdf.
- Yakovlev F.L., 2015b. About the evidence of influence of an isostasy on formation of folded and mountain building structure of Greater Caucasus. In: Tectonics and geodynamics of a continental and oceanic lithosphere: general and regional aspects. Materials of XLVII Tectonic meeting. GEOS, Moscow, vol. 2, p. 314–318 (in Russian) [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 XLVII Тектонического совещания*. М.: ГЕОС, 2015b. Т. 2. С. 314–318].
- Yakovlev F.L., 2017. Reconstruction of Folded and Faulted Structures in Zones of the Linear Folding Using Structural Cross-Sections. IPE RAS, Moscow, 60 p. (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Реконструкция складчато-разрывных структур в зонах линейной складчатости по структурным разрезам. М.: ИФЗ РАН, 2017. 60 с.]. Available from: <http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/Реконструкция-складчатости-Яковлев-2017.pdf>.
- Yakovlev F.L., Voitenko V.N., 2005. Application of the deformation tensor conception for the estimation of deformations in different-scale folded structures. In: Proceedings of VII International Interdisciplinary symposium and International Geoscience Programme (IGCP-476) "Regularity of structure and evolution of geospheres" (Vladivostok, September 20–25, 2005). Pacific Oceanological Institute of FEB RAS, Vladivostok, p. 66–69.



Яковлев Федор Леонидович, докт. геол.-мин. наук, в.н.с.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия
Тел.: +7(499)2549950; ✉ e-mail: yak@ifz.ru

Yakovlev, Fyodor L., Doctor of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia
Tel.: +7(499)2549950; ✉ e-mail: yak@ifz.ru



Горбатов Евгений Сергеевич, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия
Тел.: +7(499)2549950; e-mail: e.s.gor@mail.ru

Gorbatov, Evgenii S., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia
Tel.: +7(499)2549950; e-mail: e.s.gor@mail.ru