

УДК 551.24.035

МНОГОРАНГОВЫЙ ДЕФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУР ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ

© 2008 г. Ф. Л. Яковлев

Представлено академиком Ю.Г. Леоновым 25.07.2007 г.

Поступило 13.08.2007 г.

Среди остающихся до сих пор не решенными проблем геотектоники и структурной геологии вопрос о происхождении складчатости является самым старым и самым сложным. В тектонофизике механизм формирования складчатых структур понимается как описание их геометрии и реологических свойств слоистой среды в совокупности с внешней нагрузкой (и внутренними силами) или с количественным описанием изменений формы от исходной к существующей. В рамках современной господствующей парадигмы, тектоники литосферных плит, эта проблема скорее обходится стороной, чем решается, поскольку общепринятые коллизионные схемы образования складчатости позволяют давать только самую общую интерпретацию конкретных структур. При этом игнорируется богатая информация о деформациях, которая запечатлена в складках и разрывах и может быть получена при полевых исследованиях, и существующее в природе разнообразие структур сводится к простым схемам. Соответственно, механизмы деформаций складчатых структур целиком или по частям детально не исследуются, и получаемая геодинамическая модель конкретного региона может иметь существенные ошибки и значительные пробелы. Одной из причин отсутствия прогресса в решении проблемы складкообразования может быть использование в качестве объектов специального исследования тех структур, которые традиционно выделяются в целях геологического картирования. Тектонофизическое описание механизма их формирования обычно вызывает трудности, поскольку границы исследуемого традиционного объекта либо не определены, либо не совпадают с границами действия исследуемых механизмов. Как будет показано ниже, более надежен подход, при котором границы объектов исследования совпадают с границами действующих механизмов.

Среди несомненных методических успехов последних десятилетий выделяется изучение предгорных и межгорных прогибов с их складчато-надвиговыми структурами, которые получают хорошую интерпретацию и количественную оценку своей деформации благодаря распространенному методу сбалансированных разрезов [13]. Внутренние части складчато-надвиговых поясов, в отличие от предгорных прогибов, имеют осадочный чехол, представленный гораздо более мощными флишевыми и сланцевыми толщами, смятыми в большое количество мелких складок, а их фундамент претерпел значительные пластические деформации. Метод сбалансированных разрезов для этих структур неприменим по ряду причин. Наиболее важная и очевидная – возможные или несомненные изменения длины слоев в процессе деформации. Другая, не столь очевидная, – невозможность корректно дорисовать складчато-разрывную структуру на глубину более 3–4 км и в ее размытую часть. Сделать это можно, только если известны тип и величина деформации структуры. Анализ публикаций показывает, что корректная количественная оценка деформаций в пределах внутренних частей складчатых сооружений опирается на методы стрейн-анализа [12] и касается, как правило, только очень небольших частей структуры. Как уже упоминалось выше, при интерпретации структуры внутренних частей складчатых сооружений чаще всего используются схемы строения предгорных прогибов – рисуются крупные складки в сочетании с надвигами, которые в нижней части структуры объединяются в единую поверхность полового детачмента. Здесь необходимо отметить странность такого широко применяемого подхода с методологической точки зрения: структура с компетентным толстослоистым чехлом, подстилаемым жестким недеформированным фундаментом, используется фактически в качестве тектонотипа для структуры с радикально другими механическими свойствами как чехла, так и фундамента. Все эти методические проблемы не позволяют выявлять реальную структуру внутрен-

них частей складчатых сооружений и определять механизмы ее образования.

С нашей точки зрения, причина описанной ситуации лежит в недостаточном использовании тектонофизического подхода к исследованию объектов структурной геологии. Как известно, любая наука начинается с выделения объекта исследования. Традиционные морфологические классификации складок и складчатых структур исторически возникли для нужд геологического картирования и словесного описания этих структур, т.е., строго говоря, для коммуникативных целей. Если же рассматривать складчатые структуры как некоторые объемы слоистости, в которых проявляются физические механизмы деформирования, то границы таких объектов могут не совпадать с границами традиционных морфологических объектов. Например, асимметричная антиклиналь будет иметь разные механизмы формирования разных крыльев, и для них потребуются отдельные описания. При таком взгляде понятны причины обсуждаемых неудач – традиционным объектам структурной геологии “задавались” вопросы, на которые они не могли “ответить” в принципе.

В механике один из способов описания деформации состоит в определении тензора деформации в точке (малом объеме), а с помощью элементарных физических механизмов (вращения, простого сдвига, чистого сдвига) можно дать описание процесса деформирования для некоторого конечного объема среды. Успешно используемый в структурной геологии стрейн-анализ, при котором определяются ориентировки и длины осей эллипсоида деформации, по сути и есть определение тензора для небольшого объема (образец горной породы), деформация которого принимается за однородную при определенном масштабе осреднения.

Для корректного, с точки зрения механики, описания деформаций более крупных объемов пород и толщ нами была предложена система, состоящая из семи (I–VII) иерархических уровней деформационных структур [3, 9]. Эта классификация опирается на выделение разных объемов слоистости, в которых проявляются те или иные физические механизмы. Эти механизмы могут быть комбинацией некоторых простых механизмов. Первый уровень, внутрислойный, охватывает зерна и включения и является предметом стрейн-анализа (механизмы деформирования – растворение под давлением, диффузия, межзерновое скольжение и др.). Второй уровень, слои, включает отдельные складки, в которых проявляются механизмы продольного изгиба, сплющивания, поперечного изгиба и др. Третий уровень охватывает значительные пакеты слоев и свиты; морфологически это состоящие из многих складок складчатые домены, в которых проявлены

механизмы сплющивания, простого горизонтального сдвига, вращения и т.д. Четвертый уровень охватывает осадочный чехол целиком, здесь выделяются “структурные ячейки” (термин М.А. Гончарова [2]), включающие пространство от ядра локального антиклинория до ядра локального синклинория. Пятый уровень, охватывающий целиком кору, распространяется на тектонические зоны. В структурах последних двух уровней проявляются механизмы адвекции* [2, 6], продольного изгибания, горизонтального укорочения, а также некоторые среднemasштабные механизмы, такие как гравитационное соскальзывание. Шестой уровень охватывает, возможно, литосферу целиком и объединяет ряд тектонических зон как часть подвижного пояса. К этому уровню относится мегантиклинорий Большого Кавказа, который может формироваться механизмами типа субдукции или коллизии. К седьмому уровню следует относить складчато-надвиговый пояс целиком, например Альпийский подвижный пояс. В данной работе будет показано, как можно получать более достоверную, чем обычно, информацию о структуре и степени деформированности для всех уровней складчатых структур, кроме последнего.

Уровень II, слои (отдельные складки). Механизм образования складок единичного вязкого слоя, окруженного менее вязкой средой, хорошо описан корректными уравнениями механики сплошной среды, что позволило успешно рассчитать геометрию этих структур для контрастов (отношений) вязкостей слоя и среды, равных 10, 100 и 1000, и величин укорочения от 0 до 80% [14]. Значение укорочения определяется выражением

$$Sh = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100$$

где L_0 – начальная горизонтальная длина объекта, L_1 – современная длина. По рисункам этих трех моделей [14] нами замерялись основные геометрические параметры структуры: угол между крыльями складки, длина крыла и мощность слоя. По этим замерам были построены диаграммы “угол при вершине складки–отношение длины крыла к мощности слоя”. На пространстве диаграммы замеры по трем моделям позволили построить сетку изолиний параметров величина укорочения и контраст вязкости [7]. Идея метода состояла в сравнении геометрии природных и модельных структур. В природных складках Чиаурской зоны Большого Кавказа по фотографиям или прямо в обнажениях делались замеры тех же геометрических параметров [7]. Далее, замеры в

*Здесь и далее термин “адвекция” используется в понимании В.В. Белоусова и относится к процессу ограниченной конвекции (не более половины оборота) в пределах всего осадочного слоя в условиях инверсии плотности его пород.

виде точек наносились на диаграммы, и их положение в сетке изолиний показывало величины укорочения и контраста вязкости для природных структур. Величина укорочения Sh для 73 объектов менялась от 25 до 80% при среднем значении 56%. Отношение вязкостей слоев песчаника и аргиллита составляло от 2 до 15, при среднем значении около 10. Тем самым удалось определить величины укорочения для структур уровня отдельных складок с использованием корректной модели механики.

Для складок пачек слоев, в которых чередуются более вязкие и менее вязкие слои, была разработана кинематическая модель [10]. В модели слои деформировались комбинациями определенных элементарных механизмов (изгиб и сплющивание, например), что позволило получать геометрию подобных складок с разным увеличением мощности в замке для разных по вязкости слоев. Тем самым были смоделированы основные черты природных складок. Модель была реализована в виде компьютерной программы, в которой одновременно действия механизмов обеспечивалась их малыми приращениями в большом числе итераций. По результатам вычислений построена номограмма “угол наклона крыла складки – отношение мощности компетентного слоя на крыле к его мощности в замке”, на которой нанесены изолинии величины укорочения. Также по фотографии или в обнажении измеряются наклон осевой плоскости складки, наклон слоя, мощность компетентного слоя на крыле (в точке замера наклона) и в замке. По положению замера геометрии природной складки на номограмме среди изолиний определялась величина укорочения. В той же Чиаурской зоне для 36 складок были получены величины укорочения (от 27 до 83% при среднем 56%), очень близкие к результатам, полученным по складкам единичного вязкого слоя. Для объектов в восьми локальных природных структурах величина укорочения была получена по двум методам, что позволило оценить соответствие друг другу их базовых моделей. Восемь пар замеров показали корреляцию 0.85 при близких средних значениях каждого ряда, хотя линия регрессии не является идеальной. Это означает, что свойства кинематической модели в первом приближении не отличаются от модели, корректной с точки зрения механики [10]. Заметим, что для складок единичного вязкого слоя существует модель механики, и в данном случае мы используем структуру из обычной морфологической классификации. Наоборот, для складок пачек слоев нами используются не антиклинали и синклинали, важные для целей геологического картирования, а структуры “замок плюс крыло” с таким описанием геометрии слоев, которые позволяют определять механизмы деформации и величины этих деформаций.

Уровень III, значительные пачки слоев (складчатые домены). Указанная

выше модель складок чередования слоев разной вязкости является основой корректного физического описания деформации при переходе с уровня образа к уровню складки и далее – к уровню домена [15]. Деформация самого складчатого домена фиксируется осредненной величиной укорочения складок в направлении, перпендикулярном осевым плоскостям. Длинная ось эллипсоида деформации для складки ориентируется вдоль осевой плоскости и перпендикулярно шарниру, короткая – перпендикулярно шарниру и осевой плоскости, а промежуточная – совпадает с шарниром [15]. Для характеристики домена замеряется также средняя ориентировка наклона осевых плоскостей складок и ориентировка зеркала складок в пределах домена. Для анализа структур на уровне доменов, структурных ячеек и тектонических зон используются специально составленные по полевым замерам (а не по геологической карте!) детальные структурные пересечения, максимально достоверно отражающие природную структуру. При выделении доменов в таких пересечениях следует объединять складки, параметры которых относительно одинаковы по наклону осевых поверхностей и величине укорочения складок в пределах каждого домена. Границы доменов на профиле проводятся в виде линий, параллельных осевым плоскостям. Имеющиеся разрывы обязательно используются как границы доменов. Один из слоев достраивается до границ домена; наклон линии, соединяющей эти крайние точки слоя, и является наклоном зеркала складок. Кроме того, замеряются длина и наклон линии профиля в пределах домена. Для структур линейной складчатости обычная длина отрезка профиля, в пределах которой выделяется домен, составляет 0.5–2 км, а для структурной ячейки (структура следующего уровня, шириной 5–10 км) правильно выделять от трех до десяти доменов. Поскольку домен характеризуется эллипсоидом деформаций, к нему можно последовательно применить три простых геометрических преобразования – поворот до горизонтального положения зеркала складок, горизонтальный сдвиг до вертикального положения осевой плоскости и горизонтальное растяжение для приведения эллипса к кругу, а складчатой структуры, соответственно, к доскладчатому состоянию. В результате преобразований отрезок линии профиля приобретает другие длину и наклон и находится среди горизонтальной слоистости. Разрыв считается плоскостью, принадлежащей домену, и теми же преобразованиями рассчитывается его первоначальный (доскладчатый) наклон, а вертикальное смещение определяет разницу стратиграфических глубин для слоев на разных крыльях разрыва. Объединяя соседние домены и учитывая смещения по разрывам, получаем доскладчатое состояние для всего профиля в виде совокупности отрезков линии профиля, со-

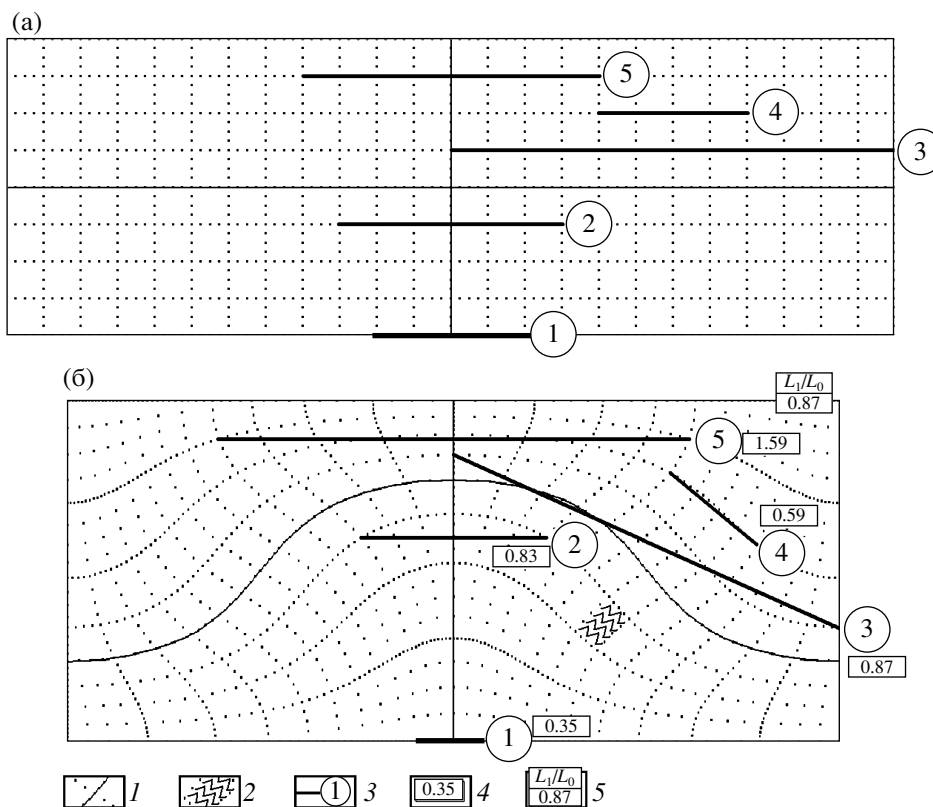


Рис. 1. Структурная ячейка как минимальная структура, укорочение которой совпадает с тектонически обусловленным горизонтальным сокращением осадочного чехла. а – две смежные ячейки в начальном состоянии, б – те же две ячейки после действия квазиизгиба (комбинации адвекции [2] и сплющивания). 1 – первоначальная сетка и ее искажение, сплошная линия сохранила свою длину, 2 – символическое изображение складок в пределах условного домена, 3 – отрезок и его номер, 4 – величина горизонтального укорочения для отрезка, 5 – величина общего укорочения для ячеек. Показана неоднородность деформации горизонтального сокращения для разных структур в пределах ячеек; сокращение совпадает с общим укорочением только для отрезка 3.

ответствующих доменам, внутри горизонтальной слоистости осадочного чехла [10].

Уровень IV, осадочный чехол (структурные ячейки), и последующие (V, VI) уровни. Имея доскладчатое состояние всех доменов, легко определить величину горизонтального укорочения для любого их сочетания, от структурной ячейки до тектонической зоны. Однако есть проблема неоднородности деформации и определения именно внешнего (тектонического) укорочения. Анализ локальных деформаций при изгибном механизме в пределах структурной ячейки (рис. 1) показал, что минимальной структурой, в пределах которой можно получить величину общего укорочения чехла, является именно структурная ячейка от ядра небольшого антиклинария (или антиклинали 1-го ранга) до ядра синклинория. Последнее соображение позволяет впервые перейти к построению сбалансированных трехмерных (объемных) моделей структур линейной складчатости в пределах тектонических зон (рис. 2) и всего мегантиклинария [11]. Для этого собираются данные о

мощности осадочного чехла и построенный доскладчатый профиль делится на ячейки, доскладчатая ширина которых соизмерима с мощностью осадочного чехла. Величина укорочения каждой ячейки вычисляется исходя из современной и доскладчатой ширины доменов, объединенных в эту ячейку. Новая вертикальная мощность ячеек вычисляется как функция исходного объема слоистости (или площади в разрезе), неизменности этого объема, отсутствия деформации вдоль шарниров складок и величины укорочения ячейки. Нами для исследования складчатой структуры Северо-Западного Кавказа использованы 11 детальных пересечений [1, 6], в которых выделены 244 домена, объединенные затем в 42 ячейки. Величины укорочения для ячеек меняются от 2 до 67%, составляя в среднем 35% при максимальной доскладчатой ширине структуры в 82,3 км. Доскладчатые и вычисленные постскладчатые мощности осадочного чехла для этих ячеек позволили построить три объемные модели для трех условных стадий развития этой структуры [11]: доскладчатой, постскладчатой (доорогенной) и орогенной (современной). Было выявлено, что вычисленные

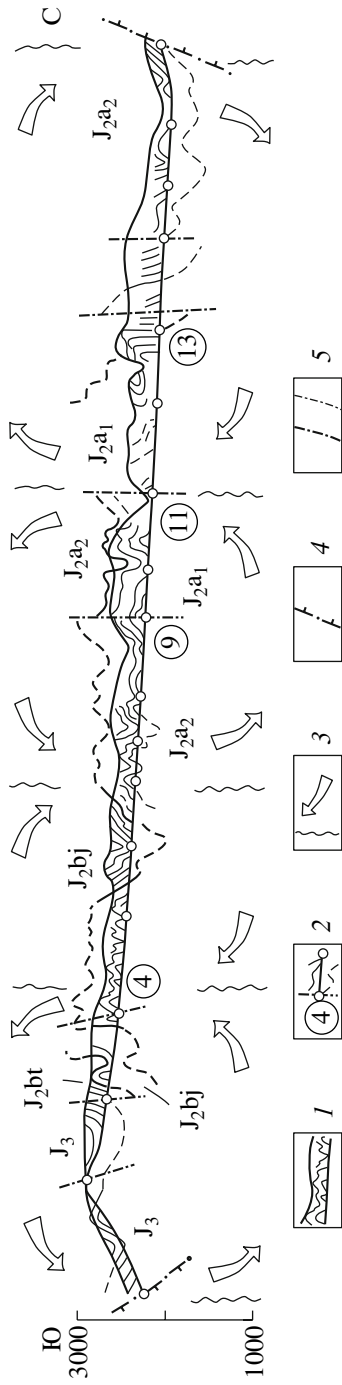


Рис. 2. Соотношение структур разного ранга на примере разреза Транскокавказской тектонической зоны Юго-Восточного Кавказа (по [4], с изменениями). Показаны 17 доменов и четыре структурные ячейки. 1 – отдельные складки, 2 – границы домена и его номер, 3 – границы структурных ячеек и общее направление движения вещества в них, 4 – границы тектонической зоны, 5 – разрывы крупные и малые.

современные значения глубин кровли фундамента (от 3 до 30 км при средней глубине в 12 км) существенно превышают величины 5–7 км, характерные для общепринятых моделей пододвигания структур Закавказского массива под Большой Кавказ. Отметим, что имеющиеся современные геофизические данные о рельефе границы чехол–фундамент для пересечения Туапсе–Хадыженск [5] оказались близки к полученным нами величинам.

Итак, получены новые данные о строении зон коллизии [9, 11]. В пределах Большого Кавказа накопленные доскладчатые мощности мезо-кайнозойского чехла достигают 12–17 км, в то время как в пределах расположенного южнее Закавказского массива эта мощность не превышает в среднем 5–7 км. Таким образом, разлом, разделяющий эти структуры, должен представлять собой сброс с амплитудой до 10 км по подошве чехла на момент начала складкообразования. В результате укорочения при складчатости в пределах Большого Кавказа общая постскладчатая вертикальная мощность чехла увеличилась в среднем вдвое, до 25–30 км, в то время как структуры Закавказского массива остались недеформированными. Поскольку для южных частей Большого Кавказа в современной структуре местами наблюдаются самые верхи разреза, амплитуда сброса по обсуждаемому разлому по подошве чехла может возрастать до 15–20 км [9, 11]. Такая схема допускает появление надвигов верхней части разреза Большого Кавказа на опущенные участки Закавказского массива. Такие локальные надвиги исследователями обычно ошибочно принимаются за структуры регионального масштаба и они используются, соответственно, как обоснование схем пододвигания Закавказского массива под Большой Кавказ (т.е. процессов А-субдукции). Таким образом, предлагаемая общая схема строения осадочного чехла Большого Кавказа и формирования его складчатости состоит в значительном общем погружении фундамента до глубин 20–30 км относительно соседних сближающихся субплатформенных блоков, что исключает возможность регионального применения схемы А-субдукции. Поскольку существенное складчатое укорочение пространства флишoidных осадочных толщ большой мощности в центральных частях складчатых сооружений не является уникальным и присущим только Большому Кавказу, выявленная схема строения зоны коллизии может иметь универсальное значение, что может повлечь за собой пересмотр соответствующих геодинамических моделей.

Таким образом, предложен новый принцип выделения объектов линейной складчатости для целей определения механизмов ее формирования, состоящий в проведении границ структур таким образом, чтобы объем выделяемого объекта был охвачен одним механизмом деформирова-

ния. Выделение объектов на основе традиционных для структурной геологии морфологических классификаций возможно только тогда, когда эти объекты имеют единый и полный механизм своего формирования. Предложенная ранее система иерархии объектов линейной складчатости, состоящая из семи рангов структур, в каждом из которых проявляются свои специфические наборы механизмов, удовлетворяет этому принципу. Указанный подход позволяет получать надежные и существенно новые данные о строении и механизмах формирования структур линейной складчатости, а также корректно определять величины их укорочения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гиоргобини Т.В., Закарая Д.П.* Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. Тбилиси: Мецниереба, 1989. 60 с.
2. *Гончаров М.А.* Механизм геосинклиального складкообразования. М.: Недра, 1988. 264 с.
3. *Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л.* Тектонофизика. Планета Земля. Энциклопедический справочник. Т. Тектоника и геодинамика. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. С. 121–134.
4. *Рогожин Е.А., Яковлев Ф.Л.* // Геотектоника. 1983. № 3. С. 87–98.
5. *Шемпелев А.Г., Пруцкий Н.И., Фельдман И.С., Кухмазов С.У.* В кн.: Тектоника неогена: общие и региональные аспекты. М.: Геос, 2001. Т. 2. С. 316–320.
6. *Шолло В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А.* Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192 с.
7. *Яковлев Ф.Л.* // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1978. Т. 53. № 5. С. 43–52.
8. *Яковлев Ф.Л.* // Геотектоника. 1987. № 4. С. 31–48.
9. *Яковлев Ф.Л.* Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа). М.: ОИФЗ РАН, 1997. 76 с.
10. *Яковлев Ф.Л.* В кн.: Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 311–332.
11. *Яковлев Ф.Л.* В сб.: Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. 2. М.: Геос, 2007. С. 392–396.
12. *Ramsay J.G., Huber M.I.* The Techniques of Modern Structural Geology. V. 1. Strain Analysis. L.: Acad. Press, 1983. 307 p.
13. *Ramsay J.G., Huber M.I.* The Techniques of Modern Structural Geology. V. 2. Fold and Fractures. L.: Acad. Press, 1987. P. 308–700.
14. *Hudleston P.J., Stephansson O.* // Tectonophysics. 1973. V. 17. № 4. P. 299–321.
15. *Yakovlev F.L., Voitenko V.N.* In: Proc. VII Intern. Interdisciplinary Symp. and Intern. Geoscience Programme (IGCP-476) "Regularity of Structure and Evolution of Geospheres". Vladivostok, 2005. P. 66–69.