

На правах рукописи



ЯКОВЛЕВ Федор Леонидович

**МНОГОРАНГОВЫЙ ДЕФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ
ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ
НА ПРИМЕРЕ
АЛЬПИЙСКОГО БОЛЬШОГО КАВКАЗА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Специальность 25.00.03
Геотектоника и геодинамика

Москва, 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Владимир Георгиевич Трифонов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический Институт Российской академии наук (ГИН РАН, г. Москва), главный научный сотрудник.

Семен Иойнович Шерман, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск), главный научный сотрудник.

Анатолий Михайлович Никишин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ, г. Москва), заведующий кафедрой региональной геологии и истории Земли.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт наук о Земле

Защита состоится « 28 » мая 2015 г. в « 14 » часов на заседании Диссертационного совета Д.002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) по адресу: 123995, Москва Д-242, Большая Грузинская ул., д. 10, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института <http://www.ifz.ru/>

Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте ИФЗ РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123995, Москва, Д-242, Большая Грузинская ул., д. 10, ИФЗ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Олегу Григорьевичу Онищенко

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



О.Г. Онищенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1. Актуальность темы диссертации, степень ее разработанности

Диссертация посвящена проблеме строения и механизма формирования областей линейной складчатости (общего смятия), которые находятся в центральных частях складчато-надвиговых поясов. Эта проблема существует с конца XVIII века, но до сих пор является дискуссионной, а основные черты строения областей такой складчатости продолжают оставаться неясными. В подвижных поясах встречаются и другие типы складчатости – складки и надвиги предгорных прогибов и комплексы сложной метаморфогенной складчатости; происхождения этих структур работа не касается. В проблеме генезиса линейной складчатости не решены ее два основных вопроса – какова величина деформации (укорочения) структуры и каковы механизмы ее формирования. С середины XX века эти вопросы традиционно решались путем разработки умозрительных моделей, связанных с общими теоретическими установками исследователей, в рамках интерпретационного направления хода мысли – от общего к частному. Это способствовало возникновению множества моделей формирования природных складчатых структур, имеющих низкую достоверность, причем это было одинаково характерно для основных конкурировавших концепций – и для мобилизма, и для фиксизма. Нерешенность именно этой проблемы является одной из важных причин кризиса, существующего сегодня в тектонике, который выражается в том, что используются умозрительные геодинамические модели, выдвинутые десятилетия назад, а новых и проверяемых количественных моделей не появляется. Таким образом, несмотря на большую длительность исследований, разработанность проблемы остается низкой.

Существуют три основных процесса формирования и преобразования земной коры из бывших осадочных пород (или консолидации, создания ее «гранитного» слоя): магматизм, метаморфизм и складчатость. Эти процессы не идут постоянно, а занимают относительно короткий период в конце крупных тектонических циклов (для фанерозоя – каледонский, герцинский, киммерийский, альпийский). В методическом отношении, несмотря на все существующие проблемы, процессы метаморфизма имеют такие модели, которые позволяют ставить и решать конкретные задачи (например, используя минеральные Р/Т датчики). Примерно то же можно сказать и об уровне исследований магматических процессов. Из этих трех процессов только формирование складчатости не имеет в настоящее время достоверного описания

своих основных причин и свойств. Таким образом, решение проблемы механизма формирования складчатости, в первую очередь – линейной, может являться ключом к пониманию основных закономерностей развития земной коры и формирования многих типов месторождений полезных ископаемых. В этом состоит актуальность темы диссертации.

2. Основная цель и конкретные задачи исследования

Анализ методических основ применявшихся ранее подходов показал, что качественное умозрительное (без использования количественных моделей) формирование гипотез образования линейной складчатости не дает такого результата, достоверность которого может быть подтверждена в рамках строгой методологии. Известно, что не существует способов достоверно достраивать видимую часть структурного разреза вверх и вниз от линии профиля, поэтому представления об общей геометрии структуры могли быть только индивидуально-авторскими. Поскольку дорисовка структуры производилась всякий раз под влиянием теоретических моделей, то возникал «логический круг» – интерпретация конкретной природной структуры использовалась для подтверждения выдвигаемой модели. При этом не ставились цели достоверно определить такие важные параметры структуры как «величина сокращения» и «тип и амплитуда механизма». Надежды на использование в этой области исследований методов механики (изучение поля напряжений), существовавшие с середины XX века, не оправдались по ряду причин, в частности, поскольку в этой дисциплине традиционно исследуются только малые деформации. Ситуация осложнялась значительной разномасштабностью явления: в типичной природной структуре одновременно формировались складки размерами от сантиметров до первых километров.

Для прогресса в решении проблемы требовалось, прежде всего, разработать понятие иерархии объектов линейной складчатости, связанной с механизмами их формирования. Понятие самого механизма формирования должно было значительно отличаться от существующего в рамках механики сплошной среды (но по-прежнему опираться на принципы механики), поскольку оно должно было связывать геометрию развивающейся структуры с амплитудой этого механизма в виде кинематической модели. Решить проблему определения величины укорочения можно было только в рамках представлений об иерархии складчатости с использованием соответствующих масштабу объекта кинематических моделей. Методы определения того, какой именно

механизм формировал изучаемую структуру, должны были зависеть от масштаба и характера объекта. В частности, требовалось найти такой язык описания объектов одного масштаба, который был бы связан с их деформацией, и мог быть применен и к природным, и к экспериментальным моделям с целью их наиболее объективного сопоставления. **Создание совокупности методических разработок такого типа для всего спектра объектов являлось основной целью работы.**

Из этого вытекали следующие **основные конкретные задачи исследования**:

1. Разработка иерархии объектов линейной складчатости;
2. Разработка (или поиск) моделей формирования разных типов отдельных складок и создание количественных методов определения величин деформации на их основе.
3. Апробация методов исследования отдельных складок на природном материале.
4. Разработка представления о складчатом домене и эллипсоиде деформаций для него как основе языка описания деформации структур крупнее отдельных складок.
5. Разработка метода определения величины укорочения и восстановления доскладчатых структур крупнее отдельных складок (метода построения сбалансированных профилей).
6. Апробация методов восстановления доскладчатой структуры на ряде природных объектов с целью создания объемных сбалансированных моделей их формирования.
7. Апробация языка описания деформаций крупных структур для природных и модельных (теоретических и экспериментальных) структур с целью их сопоставления и выявления тем самым действовавших в них механизмов формирования.

3. Методические основы реализованных подходов и использованные методы

В соответствии с основными принципами тектонофизики при разработке методов использовались законы физики (сохранение массы вещества, т.е. объема при постоянстве плотности пород) и принципы механики (описание деформаций объектов через эллипсоид деформации), законы геометрии. Эти законы имели приоритет перед любыми моделями геодинамики. В работе при создании моделей крупных структур игнорировались любые схемы, модели и механизмы умозрительного характера. Такие модели создавались путем объединения структур меньшего размера, т.е.

использовался ход исследования от частного к общему (а не наоборот, как это обычно делается при создании геодинамических моделей).

Использованные в работе методы включали в себя ряд стандартных – составление структурных пересечений в поле, сбор фактического материала о морфологии складок путем зарисовок, фотографирования и замеров элементов геометрии, структурно-исторический анализ геологических карт и др. Были использованы материалы стрейн-анализа, выполненного В.Н. Войтенко. Основные методы исследования, с помощью которых получены основные результаты, опираются на принципы механики, являются собственными и были разработаны специально. Эти методы перечислены в параграфе «Научная новизна».

4. Фактический материал и личный вклад автора

В исследовании использован фактический материал нескольких видов: по отдельным складкам и по структурным пересечениям Большого Кавказа, по экспериментальным моделям. Полевой материал по морфологии отдельных складок в пределах Чиаурской тектонической зоны центрального сектора Большого Кавказа и Тфанской зоны Юго-Восточного Кавказа был собран самостоятельно в 1976-1981 гг., материал по некоторым складкам в Северо-Западном Кавказе для стрейн-анализа собран совместно с А.В. Марининым, материал по морфологии складок в Воронцовском покрове собран при участии А.В. Маринина, Л.А. Сим и П.П. Гордеева. Стрейн-анализ по образцам из складок СЗ Кавказа выполнен В.Н. Войтенко. Наиболее детальные (1:10000) структурные пересечения Тфанской и Шагдагской зон были составлены в течение 1979-1981 гг. Е.А. Рогожиным при участии автора. Структурные пересечения через Чиаурскую зону (1:100000) составлены самостоятельно, пересечения по Северо-Западному Кавказу использованы полностью из опубликованной литературы (авторы – Т.В. Гиоргобиани и Е.А. Рогожин). Детальные фотографии опубликованных ранее экспериментов по воспроизведению складчатости бокового давления и гравитационного оползания (центрифугирование) были любезно предоставлены для использования в 1990-х годах их автором – В.Г. Гутерманом. Неопубликованные фотографии экспериментов по воспроизведению адвективных структур (слоистая канифоль) примерно в это же время были любезно предоставлены М.А. Гончаровым. Фотографии экспериментов Дж. Диксона брались из его публикаций 1991 и 2004 гг. Вся обработка материала по собственным методикам проводилась самостоятельно. Использованное специальное программное обеспечение является собственным, составленным в среде Turbo-Basic в разные годы.

В исследовании использованы разработанные предшественниками модели единичного вязкого слоя [Hudleston, Stephansson, 1973] и математическая модель адвекции М.А. Гончарова [1988]. Остальные модели и все методы являются оригинальными. В обосновании необходимости использования эллипсоида деформации для описания деформации складки и домена участвовал В.Н. Войтенко [Yakovlev, Voitenko, 2005]. Методы исследования отдельных складок в первоначальных версиях и результаты их применения в Чиатурской зоне ранее составили материал кандидатской диссертации автора [Яковлев, 1979].

5. Достоверность полученных результатов

Высокая достоверность результатов в части исследований отдельных складок обеспечивается опорой на принципы механики (складки пачек слоев) и на расчетную модель (метод конечных элементов для складок единичного вязкого слоя) и высокой корреляцией между результатами использования двух методов. Эти результаты в целом подтверждаются общепринятыми методами стрейн-анализа. Высокая достоверность результатов восстановления доскладчатой структуры по геометрии складчатых доменов обеспечивается следованием принципам механики и проверяемыми расчетами, а также использованием наиболее корректного и детального материала структурных пересечений. Имеющийся структурный материал подтверждает правильность использованного представления о плоской деформации, т.е. об отсутствии удлинения складок вдоль их шарниров. Величины укорочения структур разного масштаба, полученные с помощью разработанных методов, таким образом, обоснованы использованием принципов механики и законов геометрии. Сбалансированные по объемам стратиграфических толщ квазитрехмерные трехстадийные модели строения осадочного чехла являются достоверными по тем же основаниям, а также, там, где это возможно, в основном подтверждаются геофизическими данными.

6. Научная новизна

Работа представляет собой новое направление в тектонофизике, структурной геологии и тектонике, называемое **«многогранговый деформационный анализ структур линейной складчатости»**. Новизна работы складывается из новых методических подходов (пункты 1 – 4), методов и моделей (5 – 8), а также полученных результатов (9 – 17).

1. Предложено выделять в качестве объектов исследования не традиционные складчатые структуры, удобные для целей картирования, а иерархически

соподчиненные объекты, формирование которых в пределах определенного объема слоистости описывается разработанными для них кинематическими моделями (механизмами).

2. Предложен язык описания деформаций структур крупнее домена (который состоит из ряда складок), основанный на геометрических свойствах домена (измеряются наклон осевой поверхности, наклон зеркала складок и величина укорочения складок), сопоставляемых с эллипсоидом деформаций, и включающий новое понятие "амплитуда механизма".

3. Предложены и реализованы многоэтапные вычислительные процедуры реконструкции крупных складчатых структур, обобщающие результаты от мелких к крупным (от частного к общему), что позволяет методически корректно восстанавливать геометрию природных объектов, не связывая ее с существующими теоретическими схемами.

4. Предложен и апробирован метод сопоставления природных и модельных структур с использованием количественных параметров геометрии складчатого домена (смотри п.2, язык описания деформаций), позволяющий находить объективные закономерности теоретических механизмов и выявлять возможные результаты их действия в природных объектах, тем самым получая обоснованные выводы о генезисе природных структур.

5. Предложена кинематическая модель формирования складок пачек слоев (версия 2002 г., модифицированная) и разработан основанный на ней метод определения величины укорочения и соотношения действовавших механизмов.

6. С использованием принципов механики разработан метод определения величины сокращения структур от складчатого домена и крупнее, который является основой метода построения сбалансированных разрезов по геометрии домена. В настоящий момент это единственный существующий метод построения таких разрезов в пределах хинтерланда.

7. Предложено составлять сбалансированные (на основе евклидовой геометрии и величин деформации) по объему всего осадочного чехла квазитрехмерные модели трех основных этапов развития структур линейной складчатости (результат осадконакопления, сформированная складчатость, современная структура после горообразования). Это позволяет оценивать современную глубину фундамента и объем размывших осадков верхней части чехла.

8. Дано систематическое описание результатов моделирования по воспроизведению складчатых структур разного генезиса с использованием количественных замеров геометрических параметров доменов, что позволило охарактеризовать на полуколичественном уровне основные механизмы формирования таких структур (боковое укорочение, горизонтальный простой сдвиг, адвекция, наклонные зоны сдвига, аккреционные структуры) или их комбинации (адвекция плюс укорочение и квазиизгиб). Полуколичественные процедуры сравнения позволяют отличать их друг от друга и сопоставлять с природными структурами.

9. Получены статистически значимые ряды определений величины укорочения и параметров механизмов формирования для двух типов отдельных складок (единичного вязкого слоя и пачек слоев). Зафиксированы значения от 25% до 83% при среднем 56%. Установлено, что величина укорочения связана с локальной относительно устойчивой тектонической ситуацией в структурах среднего размера в обстановке общего укорочения или чистого сдвига. В обстановке простого горизонтального сдвига (внутри зоны базального надвига или детачмента Воронцовского покрова) возникает крайне неоднородная деформация, для которой регистрируются величины деформации складок от 2% до 95% (среднее 61%).

10. Определены величины укорочения для крупных объектов типа «структурная ячейка» и «тектоническая зона». Они меняются для структурных ячеек от 36% до 67% для восточной части Большого Кавказа при средних значениях 49 – 57% (для разных тектонических зон) и от 2-10% и растяжения -10% до 67% для Северо-Западного Кавказа при среднем значении 35%. Для тектонических зон сокращение составило от 41% до 53% для восточной части Большого Кавказа и для длинных профилей Северо-Западного Кавказа – от 12% до 52% при среднем 35%.

11. Составлены квазитрехмерные модели осадочного чехла трех районов Большого Кавказа на основе данных об укорочении в пределах структурных ячеек. Распределение современных расчетных глубин кровли фундамента имеет сложный, но закономерный характер. Глубины меняются от -2.2 и -4.4 км до -13, -19, -26.3, -31.7 км при средних значениях в разных частях структур от -10.2 и -12.0 до -13.2 и -20.5 км. Показано (с точностью, связанной с принятой стратиграфической моделью), что мощность колонны размытых осадков (или амплитуда поднятия при горообразовании) достигает 12.5 км, 24.4 км, 22.2 км, при средних значениях в 9.6, 19.2, 16.1, 8.9 км, что в

3 – 5 раз превышает общепринятые значения. По отношению к параметрам любых геодинамических моделей эти данные являются независимой информацией.

12. Обоснована гравитационная природа Воронцовского покрова на основе установленного механизма формирования складок в зоне его базального надвига.

13. Для Северо-Западного Кавказа на основе исследования морфологии складчатых доменов выделены деформационные структуры, называемые «наклонные зоны пластического сдвига», обычно приуроченные к крупным надвигам. Показано, что их формирование связано с действием простого сдвига вдоль этой наклонной зоны в комбинации с минимальным горизонтальным укорочением. Для этого типа деформации выделяется специальный тип локального механизма – «принадвиговый механизм».

14. Показано, что механизм формирования складчатости тектонических зон Большого Кавказа удовлетворительно описывается моделями типа «адвекция плюс сокращение» («квазиизгиб») в комбинации с «принадвиговым механизмом».

15. По комплексу признаков обоснована невозможность использования общепринятых схем формирования аккреционной призмы (А-субдукции) для объяснения складчатости Большого Кавказа в целом. В том числе установлено по расчетным сбалансированным моделям, что структура Большого Кавказа на уровне кровли фундамента испытала погружение на 10-15 км относительно Закавказского массива по зоне разделяющего их Рача-Лечхумского разлома, что говорит о совместном укорочении чехла и фундамента южной части Большого Кавказа. Тем самым известное относительно северных блоков положение о совместной деформации чехла и фундамента распространяется на все сооружение Большого Кавказа.

16. На количественном уровне на примере построенных сбалансированных структур Большого Кавказа показано, что линейная складчатость не могла возникнуть без преобразования пород нижней и средней коры в более плотные мантийные модификации.

17. На количественном уровне с использованием корреляции ряда параметров структурных ячеек Большого Кавказа доказано существование известных ранее «геосинклинальных» закономерностей развития земной коры: те блоки, в которых накапливаются большие мощности специфических терригенных толщ, затем испытывают большее укорочение, и именно в них в конце развития возникают большие амплитуды неотектонического поднятия.

7. ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Новые принципы выделения объектов линейной складчатости, позволившие сформировать систему иерархии объектов. Для характеристики объектов использованы наборы кинематических моделей, положенные в основу комплекса методов исследования и использованных методических приемов.

2. Механизмы формирования локальных приразломных структур Воронцовского покрова и Северо-Западного Кавказа. Механизм, выявленный по описаниям деформации складок в детачменте Воронцовского покрова, отвечает горизонтальному простому сдвигу (кинематически) и гравитационному оползанию (геодинамически). Механизм формирования серии локальных приразломных наклонных зон пластического сдвигания, выявленных по морфологии складчатых доменов на Северо-Западном Кавказе, соответствует сопряженным зонам скалывания.

3. Характерные черты трендов развития механизмов формирования основных экспериментальных и теоретических моделей, позволяющие отличать их друг от друга. На основании описаний этих трендов природные структуры в Чиаурской, Тфанской и Шахдагской тектонических зонах наилучшим образом сопоставляются с моделью квазиизгиба (сочетание кинематических механизмов диапиризма и сплющивания) в комбинации с локальным принадвиговым механизмом, формирующим наклонные зоны пластического простого сдвигания.

4. Величина укорочения складчато-разрывной структуры изученной части альпийского Большого Кавказа в масштабе структурных ячеек (совместно для чехла и фундамента) имеет средние значения от 35% до 57%. Восстановленное расчетное современное положение кровли фундамента для структурных ячеек образует упорядоченные структуры на глубинах 5-30 км при средних значениях от 10 до 20 км и максимальных погружениях фундамента на южном фланге Большого Кавказа. Эродированная часть осадочного чехла имеет средние амплитуды размыва от 9 до 19 км для изученных тектонических зон.

8. Научная и практическая значимость

Основная научная ценность работы состоит в том, что разработанные подходы и методы позволяют обоснованно на количественном или полуколичественном уровне подтверждать или опровергать геодинамические модели структур линейной складчатости путем их сравнения с природными объектами. Результаты многогранного деформационного анализа могут быть использованы для выдвижения новых, более достоверных геодинамических моделей. Метод объемного

балансирования структурных пересечений может быть использован для прогноза структуры на глубины 20-30 км (что может экономить средства на геофизические исследования) и восстановления доскладчатой структуры, а также для подсчета объемов пород стратиграфических подразделений или запасов полезных ископаемых.

9. Апробация результатов исследования и публикации

Результаты исследований по теме диссертации, которые сформулированы в виде основных защищаемых положений, неоднократно представлялись автором на конференциях и совещаниях различного уровня, включая международные. Среди них всероссийские тектонические совещания (2003, 2006, 2007, 2008, 2010 гг.), тематические совещания и всероссийские конференции (1987, 1990, 1997, 2003, 2005, 2008, 2009, 2012 гг.), в том числе – тектонофизические, доклады в МОИП (1978, 2004 гг.), международные совещания в Европе на EGU (1993, 2005, 2006, 2007, 2011 гг.), на конференции GEOMOD (2012), на SETeG (2008, 2010), на конференции ILP Marseille (2013). Большинство представленных докладов было сделано единолично. Кроме этого, результаты разных этапов исследований и их обобщения неоднократно в разные годы докладывались на различных семинарах, конференциях, заседаниях коллоквиумов в ИФЗ РАН, ГИН РАН, ИГ КарНЦ РАН, в других организациях.

Разработанные подходы, методы исследований и результаты их применения в изучении природных складчатых структур, а также теоретических и экспериментальных моделей опубликованы в виде 12 статей в основных журналах из списка ВАК – Бюллетень МОИПа (1978, 2001, 2006), Геотектоника (1983, 1987, 1987), Доклады РАН (2008), Физика Земли (2009), Вестник КРАУНЦ (2010, 2012) и международных – Tectonophysics (2012), Comptes Rendus Geoscience (2012), в виде статей или глав в монографиях (7 публикаций) – «Проблемы тектонофизики» (2008), «Планета Земля. Энциклопедический справочник» (2004), «Диагностика механизмов образования линейной складчатости...» (1997), рецензируемых журналах «Geological Society, London, Memoirs» (2006), «Геофизические исследования» (2008). Другие крупные или важные статьи были опубликованы в тематических сборниках, материалах конференциях и совещаний. Подавляющее большинство публикаций являются единоличными. Общий объем публикаций составляет около 45 п.л.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации – 470 страницы (без приложения), из них 438

страниц текста, включая 194 рисунка и 44 таблицы. Список литературы состоит из 419 наименований на 32 страницах.

Благодарности

На протяжении нескольких десятилетий, в течение которых проводились исследования, автор пользовался консультациями, обсуждениями и поддержкой многих людей. В.В. Белоусов, как известно, сформулировал общую постановку задачи исследования складчатых структур, как одну из центральных проблем геотектоники, он же всячески стремился использовать законы физики и численные методы. В.Н. Шолпо принадлежит первоначальная формулировка общей задачи определения величины сокращения пространства в складчатых структурах. Очень важной для автора была организационная и моральная поддержка его усилий со стороны крупных ученых – В.Е. Хаина, Жака Анжелье (J. Angelier), Ю.Г. Леонова. В период своего обучения в МГУ (1973-1979) автор обсуждал проблемы складкообразования с сотрудниками лаборатории тектонофизики – А.В. Вихертом, М.А. Гончаровым, В.Г. Талицким, Н.С. Фроловой, А.Г. Малюжинцем. Совместные полевые работы с Е.А. Рогожиным позволили приобрести важный опыт, ему же принадлежит авторство основного массива использованных структурных данных. Многократные обсуждения геологии Большого Кавказа с М.Л. Соминим, Л.М. Расцветаевым, Е.А. Рогожиным, А.В. Марининым были очень полезны. Различные теоретические вопросы геотектоники неоднократно обсуждались с Ю.А. Морозовым, В.А. Ермаковым, Л.М. Расцветаевым, Ю.С. Геншафтом, М.Л. Коппом, Н.Б. Кузнецовым, М.Г. Леоновым, В.Г. Трифоновым, А.И. Кожуриным, А.К. Худолеем, В.Н. Войтенко. М.А. Гончаров неоднократно выполнял очень внимательное рецензирование статей автора, что привело к улучшению понимания многих аспектов тектоники и геодинамики. Настоящая работа была выполнена в лабораториях тектонофизики (в 1992-2012 гг.) и палеогеодинамики (2012-2014 гг.). Автор благодарен Ю.Л. Ребецкому, Д.Н. Осокиной, А.В. Михайловой, Л.А. Сим, А.В. Маринину и А.С. Лермонтовой за многократные заинтересованные и детальные обсуждения многих аспектов работы. Т.П. Белоусов, А.М. Корженков, А.А. Никонов, С.В. Шварев, Р.Ю. Стаховская, Л.Д. Флейфель многократно участвовали в рабочих обсуждениях материалов на финальной стадии написания работы и всячески способствовали ее завершению. Ю.Л. Ребецкий и М.Л. Сомин рецензировали

диссертацию на предварительной защите, что позволило заметно ее улучшить. Сотрудники ИФЗ РАН и других академических институтов – С.Л. Юнга, А.Ф. Грачев, М.В. Родкин, Г.Л. Косарев, В.В. Погорелов, Ю.О. Кузмин, Ю.В. Харазова, Е.Б. Чирков, П.А. Леляев, А.М. Кузин, В.В. Травин, Н.В. Шаров, В.С. Имаев, А.Л. Стром, С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, В.А. Саньков, А.В. Прокопьев, В.А. Рашидов, – на семинарах и в рабочем порядке неоднократно обсуждали важные аспекты работы, что помогало их осмыслению. Коллеги из других стран – О.Б. Гинтов, Т.В. Гиоргобиани, Р.А. Умурзаков, Ю.Ю. Подладчиков, Ш. Шмальхольц (S. Schmalholz), Д. Мозар (J. Mosar), Л. Фодор (L. Fodor), Ф. Бержерат (F. Bergerat), Ф. Рур (F. Roure), А. Сейнто (A. Saintot) проявляли интерес к получаемым результатам, что оказывало заметную моральную поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор методических подходов и основных результатов исследований по проблеме складкообразования

В начале главы коротко приводится исторический обзор развития тектоники в XX в. В обзоре показано, что для решения возникших в середине прошлого века новых задач тектоники и структурной геологии начала развиваться тектонофизика как раздел тектоники и структурной геологии, к которой и относится настоящая работа, направленная на решение проблемы происхождения складчатости.

Общий анализ методологии тектоники, структурной геологии и тектонофизики привел к выводу о недостаточном внимании к ряду важных аспектов, с чем и связаны наблюдаемые кризисные явления в тектонике, в том числе – нерешенность проблемы механизма складкообразования. В первую очередь это касается иерархии складчато-разрывных структур литологических комплексов, занимающих центральные части складчатых сооружений, в которых тонкослоистый осадочный чехол мощностью 10-15 км формирует складки самого разного размера от первых сантиметров до первых километров. Относительно полно теоретически описываются только единичные складки, поэтому можно считать, что подходы к исследованию разномасштабных структур не были найдены. Отмечено, что не были разработаны методы определения величин деформаций в складчатых структурах. Было показано, что основное движение мысли исследователей ограничивалось выдвиганием качественных (не количественных) умозрительных моделей в рамках как «фиксизма», так и «мобилизма» и попытками дать на их основе интерпретацию конкретных структур (дедукция, движение мысли от общего к частному). Это обусловило принципиальную невозможность появления новых, в том числе количественных моделей строения и развития складчатых структур.

В главе подробно разбираются основные методы и полученные результаты в трех основных направлениях структурной геологии, связанных с исследованиями складчатости: использование механики сплошной среды для анализа складок, методы стрейн-анализа и построение сбалансированных пересечений. Показано, что важные результаты имеются только в исследованиях единичных складок методами механики – появились модели, которые можно использовать для решения обратных задач. Указывается на ограниченность возможностей анализа тектонических полей напряжения в объяснении формирования складчатых структур. Методы стрейн-анализа дают достаточно надежные результаты только на масштабном уровне

образцов пород. Рассмотрены причины, по которым методы построения сбалансированных пересечений, широко используемые в предгорных прогибах, неприменимы для внутренних частей складчатых сооружений.

Весь обзор состояния проблемы сопровождается примерами конкретных исследований, как отечественных, так и зарубежных. Большая часть результатов в СССР и РФ была получена в разные годы сотрудниками В.В. Белоусова в лабораториях ИФЗ РАН и МГУ. В этом отношении предлагаемая диссертационная работа является продолжением этих многолетних исследований по широкому кругу вопросов – используются собранные полевые данные по единичным складкам (Ф.Л. Яковлев, 1978) и детальные структурные пересечения (Е.А. Рогожин, В.Н. Шолпо), данные о совместной деформации чехла и фундамента Большого Кавказа (М.Л. Сомин), ряд теоретических результатов исследований механизмов формирования крупных структур (В.Н. Шолпо, М.А. Гончаров, В.Г. Талицкий), продолжены работы с целью определения величин деформаций (В.Н. Шолпо, 1978). Анализ зарубежных исследований по проблеме формирования складок и складчатых комплексов показал отсутствие в них системности, а основные результаты оказались ограничены применением методов стрейн-анализа и разработкой в 2000 - 2010 гг. двух методов исследования единичных складок, редко используемых. Подходы к анализу более крупных структур в других странах не разрабатываются. Можно утверждать, что уровень исследований в Европе и Северной Америке отстает от уровня отечественной тектонофизики примерно на 20 лет.

На примере трех долговременных комплексных исследований Байджансайского антиклинория, Таласского Алатау и Большого Кавказа показан сложный путь развития тектонофизической методологии от простой диагностики складок продольного и поперечного изгиба до выдвижения сложных моделей формирования складчатых комплексов общего смятия и попыток сопоставления с природной структурой нескольких геодинамических схем.

Дается общая оценка состояния методологии в геотектонике, которая характеризуется как острокризисная. Важные аспекты кризиса связаны именно с отсутствием решения проблемы строения и механизма формирования структур внутренних частей складчатых сооружений как основы понимания процессов формирования кристаллической части континентальной земной коры. По результатам обзора формулируются основные направления исследований.

Текст главы составляет 78 страниц, сопровождается 14-ю рисунками, в обзоре был использован материал около 250 публикаций.

Глава 2. Краткий очерк геологического строения Большого Кавказа и описание характера структурного материала

В главе изложены общеизвестные данные о строении и основных этапах развития альпийского складчатого сооружения, охватывающего мезо-кайнозойский осадочный чехол и палеозойский фундамент Большого Кавказа (БК). Основная складчатая структура располагается между двух крупных субвертикальных разломов глубокого заложения – Пшекиш-Тырныаузского на севере и Рача-Лечхумского на юге (рис. 1А). Следующим по рангу является крупный разлом, носящий название «Главный Кавказский разлом». Он разделяет блоки с разными типами палеозойского фундамента, и, в то же время, – зоны с промежуточной позднекиммерийской складчатостью на севере (предпозднеюрская) и, на юге, – зоны непрерывного альпийского осадконакопления, завершившегося позднеальпийскими деформациями.

В обзоре наиболее известных умозрительных моделей складчатой структуры было показано, что в мобилистических моделях в складчатой структуре в основном предполагается широкое развитие чешуйчатых надвигов и наличие основного detachmenta по кровле фундамента на глубинах 7-12 км. В южной части БК наличие таких структур обязательно [Дотдугев, 1986, Robinson et al., 1996], в центральной части БК detachment может отсутствовать [Расцветаев, 2002]. Общее поперечное укорочение структуры в этих моделях обычно оценивается не менее чем в 200 км. Для моделей в рамках фиксизма [Шолпо, 1978] сокращение пространства отрицается, кровля фундамента по этим моделям находится на глубинах 5-10 км.

Рассмотрены основные черты строения и развития трех регионов (рис. 1А), структурные материалы которых легли в основу исследований – Северо-Западного Кавказа (СЗК), Чиаурской тектонической зоны в центральной части Кавказа и двух зон Юго-Восточного Кавказа (ЮВК) – Тфанской и Шахдагской. Показано, что общая мощность альпийского чехла достигает 10-15 км (рис. 1Б). В первом приближении в истории развития структуры может быть выделено три основных этапа: накопление осадков (до олигоцена), возникновение складчатости (олигоцен – ранний миоцен), горообразование (с сарматского времени, средний миоцен, по настоящее время).

Проанализировано наличие и достоверность структурного материала, необходимого для исследований (рис. 1В). Наиболее детальными и достоверными являются профили ЮВК (авторы – Е.А. Рогожин, Ф.Л. Яковлев), достаточно детальными считаются профили СЗК (Е.А. Рогожин, Т.В. Гиоргобиани) и Чиаурской тектонической зоны (Ф.Л. Яковлев). В совокупности этот материал позволяет получить надежные представления о полном пересечении основной структуры Большого Кавказа между его граничными разломами для двух его частей: в северо-западном секторе и в восточной половине. Объем главы – 39 страниц текста и 21 рисунок.

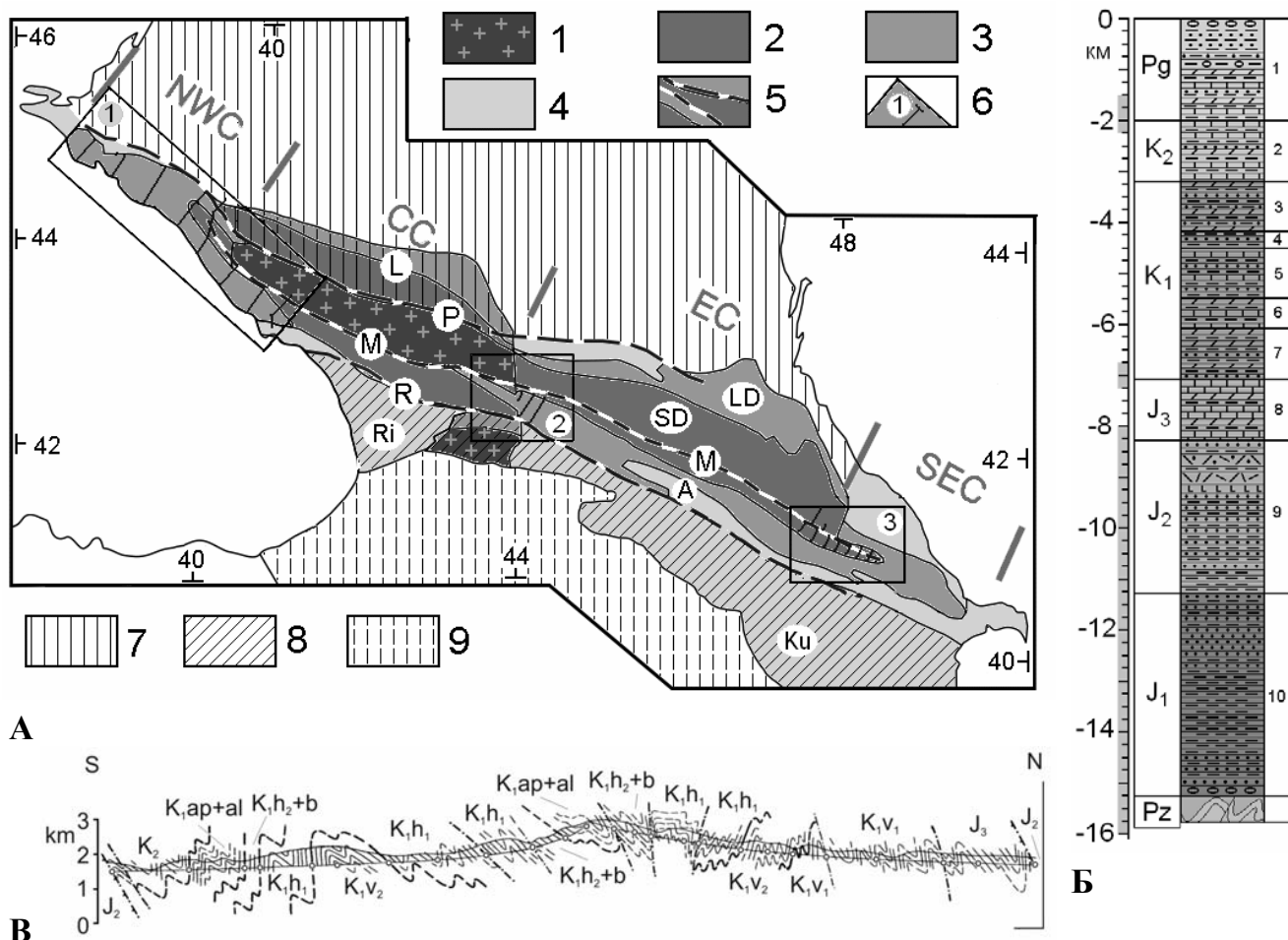


Рис. 1. Геологическое строение Большого Кавказа.

А – Структурно-геологическая схема (по [Яковлев, 2010], с изменениями, использованы материалы [Шолпо, 1978]). Показаны четыре сектора: NWC – Северо-Западный Кавказ, CC – Центральный Кавказ, EC – Восточный Кавказ, SEC – Юго-Восточный Кавказ. Выборочно показаны структуры: L – Лабино-Малкинская зона, LD – Известняковый Дагестан, SD – Сланцевый Дагестан, А – Алазанская депрессия, Ri – Рионская впадина, Ku – Куринская впадина. 1 – выходы палеозойского фундамента, 2 – юрские отложения, 3 – меловые отложения, 4 – палеоген и неоген, 5 – разломы (Р – Пшекиш-Тырныаузский, М – Главный Кавказский разлом, R – Рача-Лечхумский), 6 – исследованные регионы и, схематично, – структурные пересечения в них (1 – Северо-Западный Кавказ, 2 – Чиатурская тектоническая зона, 3 – Юго-Восточный Кавказ: Шагдагская и Тфанская тектонические зоны, 7 – структуры Скифской плиты, 8 – структуры Закавказского срединного массива, 9 – Малый Кавказ.

Б – полная стратиграфическая колонка (модель) осадочного чехла Чиатурской зоны.

В – структурный профиль через Чиатурскую зону (полный, между двух граничных разломов).

Глава 3. Иерархические уровни сложной складчатой структуры, методологические подходы к решению проблемы складкообразования

Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, в которой затрагиваются иерархические взаимосвязи структур линейной складчатости разного размера. Показано, что не существует общепринятых критериев выделения рангов структур и какой-либо единственной системы взглядов, показывающей иерархические

соотношения таких объектов. Соответственно, отсутствуют методы определения величин укорочения структур разного размера и методы диагностики механизмов их формирования. Показано соответствие существующим в литературе представлениям тех утверждений, которые лежат в основе предлагаемых методов, – 1) о сохранении объема горных пород в процессе развития деформаций (что соответствует мощностям подразделений в стратиграфических колонках при современных плотностях горных пород) и 2) об отсутствии перемещений и деформаций вдоль шарниров как в отдельных складках, так и в более крупных структурах.

Предложены и обоснованы новые принципы выделения нескольких иерархических рангов структур линейной складчатости, ранее в литературе не встречавшиеся. Основным является выделение таких объектов, с границами которых совпадают кинематические модели, описывающие их форму, а также определенный объем слоистости, которая охватывается этими структурами. Важен отказ от использования тех, уже известных, объектов, которые были выделены ранее и которые применяются для целей геологического картирования, но не могут быть полноценно описаны кинематическими моделями. Предложены семь иерархических уровней объектов линейной складчатости, от внутрислойных до всего складчато-надвигового пояса, которые связаны с объемом слоистости от зерен и слоя до всей верхней мантии. К ним относятся: I. внутрислойные объекты, II. складки (слои, пары слоев, рис. 2А), III. складчатые домены (крупные пачки слоев, в них включаются несколько складок, рис. 2Б), IV. структурные ячейки (весь осадочный чехол, объединяет несколько доменов, рис. 3), V. тектонические зоны (охвачена вся земная кора, обычная структура на поверхности – рис. 1В), VI. складчатые системы (предположительно – вся литосфера, на поверхности – Большой Кавказ), VII. подвижный пояс. Показано, что ряд

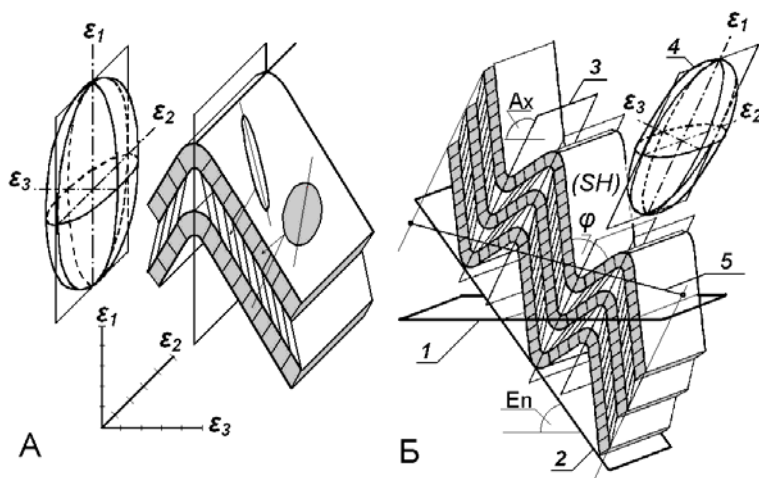


Рис. 2. Положение эллипсоида деформаций в складке и в домене относительно их морфологических элементов (по [Yakovlev, Voitenko, 2005]). А – Модель складки пачек слоев (иерархический уровень II), показывающая общую деформацию и эллипсы деформаций для отдельных слоев (компетентных и некомпетентных). Оси эллипсоида: $\varepsilon_1=l_1/l_0=2.13$, $\varepsilon_2=l_1/l_0=1.0$, $\varepsilon_3=l_1/l_0=0.47$.

Б – Основные параметры домена как совокупности нескольких складок (иерархический уровень III). 1 – горизонтальная плоскость, 2 – поверхность зеркала складок и угол ее падения E_n , 3 – осевая плоскость и угол ее падения A_x , 4 – эллипсоид деформаций, величина сокращения $SH=(1-l_1/l_0)*100\%$ (ε_3), 5 – часть линии профиля в границах домена.

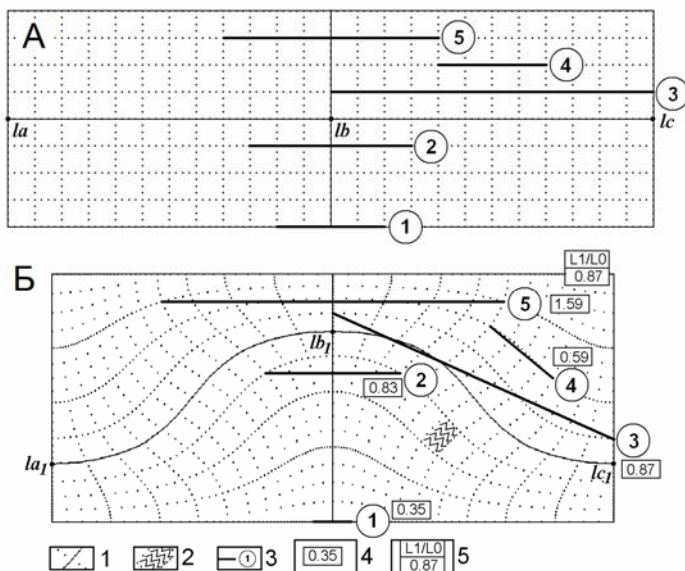


Рис. 3. Две смежных структурных ячейки (термин М.А. Гончарова) в масштабе осадочного чехла охватывают объем от ядра крупной антиклинали до ядра крупной синклинали (иерархический уровень III, по [Яковлев, 2008], на основе простейшем математической модели адвекции [Гончаров, 1979]). Показана модель квазиизгиба, в которой сохраняется длина среднего слоя (сплошная линия, соединяющая точки la , lb , lc). Укорочение ячейки (отрезок 3) совпадает с «тектонически» обусловленным горизонтальным

сокращением осадочного чехла на фоне большого разброса величин сокращения в других структурах меньшего и большего размера. 1 – первоначальная сетка (А) и ее искажение (Б); 2 – символические складки в пределах одного из условных доменов; 3 – отрезок и его номер; 4 – величина горизонтального укорочения для отрезка, 5 – общее сокращение структуры.

объектов предложенной иерархии использовался уже другими исследователями (М.А. Гончаров и В.Г. Талицкий), но упомянутые систематики были основаны на других критериях выделения уровней. Дано подробное описание основных типов структур в рамках этих семи уровней, показаны основные возможности их исследования.

Глава содержит 22 страницы текста, 3 рисунка, одну таблицу. Материал главы является обоснованием **пункта 1 защищаемых положений**, в которое входят новые принципы выделения объектов линейной складчатости и описание системы иерархии объектов, состоящей из 7 уровней.

Глава 4. Отдельные складки, механизмы их образования и методы определения величины укорочения

Рассматриваются модели формирования складок единичного вязкого слоя и складок пачек слоев, которые лежат в основе двух методов определения величины сокращения пространства [Яковлев, 1978; 1981; 2002]. Методы реализованы в виде системы замеров геометрии слоя и номограмм (рис. 4). Они остаются в настоящий момент практически единственными апробированными методами для структур этого ранга. В качестве другого аналогичного метода может рассматриваться модель и диаграмма для складок единичного вязкого слоя [Schmalholz, Podladchikov, 2001].

Результаты определения величины укорочения по морфологии слоев в складках единичного вязкого слоя и в складках пачек слоев на примере структур Чиаурской тектонической зоны показали значительную устойчивость значений для частей зоны.

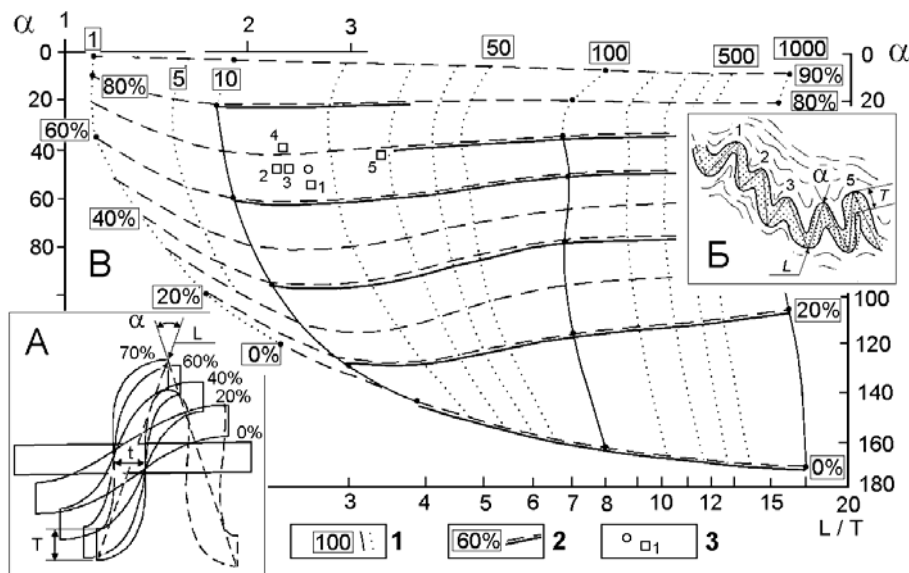


Рис. 4. Номограмма для определения величины укорочения складок единичного вязкого слоя и величины контраста вязкости η_1/η_2 слой/среда (по [Яковлев, 1978; 2008]). Показаны: А – модель [Hudleston, Stephansson, 1973] и замеры ее параметров, а также природная складка (Б) и ее замеры на номограмме (В). 1 – контраст вязкости, 2 – изолинии сокращения, 3 – замеры природной складки

Среди 72 складок первого типа величина укорочения менялась от 25% до 82% при среднем значении 56%. Распределение значений по площади региона показало явную связь параметра с деформацией средних по размеру структур, в том числе – крупных складок и их крыльев. Сокращение в 36 складках пачек слоев имеет такие же значения – от 27% до 83% при среднем 56%. Для складок единичного вязкого слоя контраст вязкости слоев «песчаник/сланец» составляет от 2 до 25 (среднее значение 8.6). Материалы исследований показывают сохранение в целом длины слоя при формировании складок.

Достоверность результатов по складкам единичного вязкого слоя обеспечивается опорой на модель механики сплошной среды [Hudleston, Stephansson, 1973]. Проверка модели пачек слоев была реализована путем сопоставления результатов двух методов для двух типов складок для 8 локальных природных структур. Сопоставление показало значительную сходимость и высокую корреляцию двух рядов значений. Проверка кинематической модели складок пачек слоев была проведена также путем сравнения теоретического и реального (стрейн-анализ) значений величины внутрислойной деформации [Яковлев и др., 2003] и подтвердила ее реалистичность.

Глава содержит 35 страниц текста и включает 23 рисунка и 6 таблиц. Материалы главы вошли в **защищаемое положение 1**, в котором говорится о наборах кинематических моделей (модель пачек слоев) и комплексе методов исследования (методы исследования складок единичного вязкого слоя и складок пачек слоев).

Глава 5. Описание деформации в складке и складчатом домене; механизмы формирования локальных структур

Деформация отдельной складки на следующем иерархическом уровне рассматривается не как скалярная величина деформации, а как эллипсоид

деформации в пределах домена, объединяющего несколько складок (уровень III в системе иерархии), для чего использованы параметры геометрии складчатого домена. К этим параметрам относятся (рис. 2Б): наклон осевых поверхностей складок (наклон длинной оси эллипсоида, AX), угол схождения слоев при вершине складок (ϕ), который пересчитывается в величину укорочения SH (длина короткой оси эллипса, длинная ось эллипса рассчитывается исходя из постоянства объема и плоской 2D деформации), наклон зеркала складок (ориентация исходной слоистости, EN). Детально описаны основные правила выделения границ доменов в природных структурах. Методический прием использования геометрических параметров домена в качестве языка описания деформаций структур модельных и природных вошел в **1-е защищаемое положение**.

В главе анализируются деформации и механизмы формирования структур, связанных с разломами, и которые не входят в предложенную иерархическую систему и относятся к «локальным». Для анализа структур в подошве Воронцовского покрова были использованы замеры параметров единичных складок (наклон осевых плоскостей и величина укорочения) в фотографиях обнажений в зоне детачмента покрова. В качестве двух альтернативных моделей были рассмотрены механизмы горизонтального укорочения и горизонтального простого сдвига (в рамках кинематики). Было показано, что в поле признаков домена «наклон осевой плоскости/величина укорочения» эти модели резко отличаются по тренду смещения параметров при увеличении «амплитуды» механизмов (рис. 5). На диаграмме сопоставления моделей в поле указанных двух параметров точки 39 природных складок образовали облако (рис. 5), явно тяготеющее к модели простого сдвига,

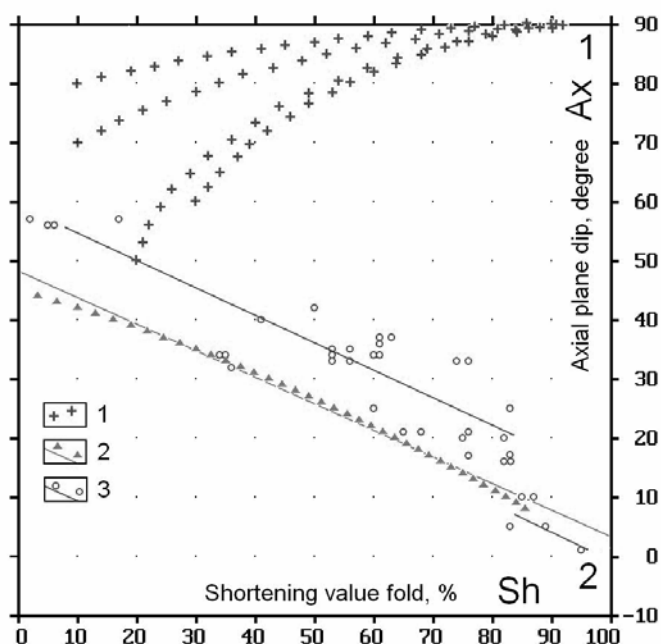


Рис. 5. Результаты замеров деформационных параметров складок Воронцовского покрова AX и Sh . По [Яковлев и др., 2008; Yakovlev, 2012]. Показано сравнение природных данных с модельными.

1 – модель горизонтального укорочения, 2 – модель простого горизонтального сдвига, 3 – позиции замеров природных складок как элементов эллипса деформаций

которая в геодинамическом отношении сопоставлялась с моделью гравитационного оползания покрова. Альтернативная модель бокового давления этими данными не подтвердилась. Этот результат вошел в **пункт 2 защищаемых положений**.

Массив замеров геометрии 250 доменов в структуре СЗК показал на трехмерных диаграммах основных параметров доменов (AX/SH, EN/SH, AX/EN) две совокупности (59 и 20 точек), предположительно связанные с наклонными зонами простого сдвига. Были рассчитаны две кинематические модели таких структур, комбинирующие простое сдвигание вдоль наклонной плоскости с горизонтальным однородным укорочением. Использовались два варианта исходного наклона такой плоскости в модели: 20° (субгоризонтальные надвиги вдоль слоистости) и 45° (надвиги вдоль обычного угла скалывания). Было показано, что вариант наклона 45° в версии итераций большого сдвига (6°) и малого укорочения (1%) хорошо удовлетворяет природным структурам. Результат также вошел в **пункт 2 защищаемых положений**. Глава содержит 30 страниц текста, 22 рисунка и 3 таблицы.

Глава 6. Домены, структурные ячейки и тектонические зоны – определение величины деформации и восстановление структуры

В качестве методов измерения сокращения пространства в структурах крупнее единичной складки рассмотрены метод избыточной длины слоя, а также F-функция Дж. Рэмзи [Ramsay, Huber, 1987] и «динамическое» ретробалансирование [Lechmann et. al., 2010]. Показано, что в них либо измеряется модельная, а не природная структура, либо они могут применяться только для небольших по размерам объектов. Делается вывод, что предложенный метод составления сбалансированных профилей по геометрии складчатых доменов [Яковлев, 1987, 2009] является единственным работоспособным методом определения величины сокращения пространства и восстановления складчато-разрывной структуры в пределах хинтерланда.

Подробно рассмотрен порядок операций, в результате которых определяются размеры доскладчатого бассейна осадконакопления, величины сокращения пространства в масштабе структурных ячеек. Показан также порядок построения сбалансированных моделей трех стадий развития БК – доскладчатой, постскладчатой и современной. Источником исходного материала являются детальные профили природной структуры, в которых выделяются домены. Замеры параметров доменов используются для приведения каждого домена к доскладчатому состоянию в результате операций поворота, простого горизонтального сдвига и растяжения (рис. 6). В результате исходный отрезок природного профиля, имеющий некоторый наклон, приобретает новую длину и наклон внутри горизонтально слоистой среды домена.

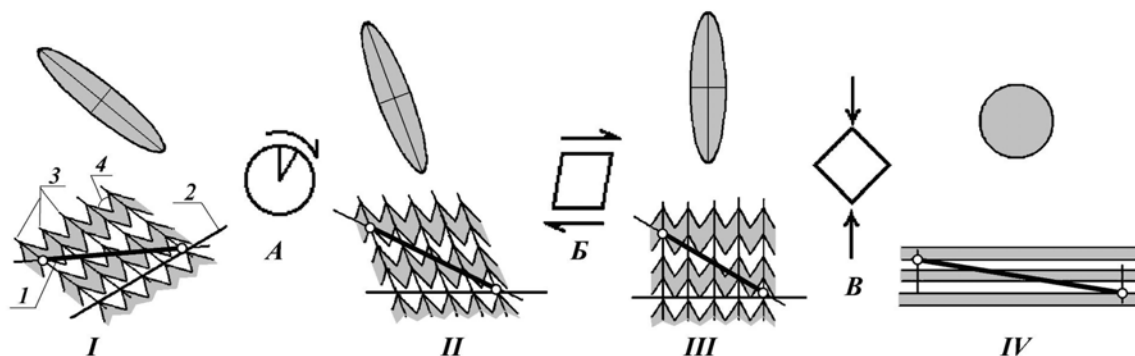


Рис. 6. Операции восстановления доскладчатого состояния домена [Яковлев, 2008]. Показана складчатая структура домена (1–4) для состояний от современного (I) к доскладчатому (IV) и соответствующие эллипсы деформаций. А – поворот (от состояния I к состоянию II), Б – горизонтальный простой сдвиг (от II к III), В – растяжение (вертикальный чистый сдвиг, от III к IV). 1 – отрезок линии профиля (длина и наклон); 2 – линия зеркала складок (наклон); 3 – осевые поверхности складок (наклон); 4 – угол схождения крыльев (величина сокращения складок)

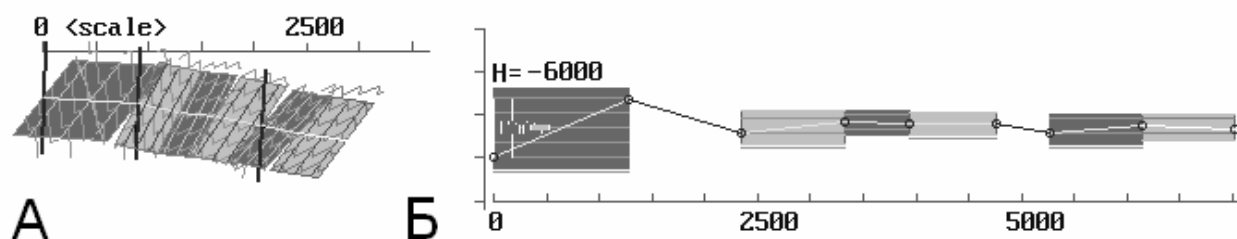


Рис. 7. Операции восстановления доскладчатого состояния структурного пересечения с использованием компьютерной программы (копия экрана; 6 доменов и 2 надвига в части профиля 3, Тфанская зона). Показаны: А – образ складчатой структуры, построенной по замерам геометрии природных доменов, Б – та же структура, доскладчатая стадия.

Плоскости разрывов преобразуются теми же операциями к доскладчатому наклону. По разнице в стратиграфическом уровне соседних блоков (вертикальная амплитуда) и наклону разрыва устанавливается горизонтальная амплитуда смещения. Последовательно добавляя домены друг к другу, можно получить структуры из нескольких доменов или структуру всего профиля, имея при этом и современную, и доскладчатую их ширину (рис. 7). По этим результатам определяется величина укорочения любых структур размера крупнее домена.

В методе построения объемных сбалансированных структур использовались структурные ячейки (рис. 3), которые в доскладчатом состоянии вкрест простирания имели ширину, сопоставимую с мощностью осадочного чехла (рис. 8А). Для восстановления геометрических параметров каждой структурной ячейки использовалась ее стратиграфическая модель (рис. 1Б). Соответственно, для каждого домена (для его отрезка профиля) определялась глубина в стратиграфической модели, а для части профиля, соответствующей каждой структурной ячейке – его средняя

глубина. Для ячейки определялась также средняя гипсометрическая высота профиля на местности. Величина сокращения для конца условного этапа чисто складчатых деформаций (второй этап) позволяла найти максимально возможную глубину погружения кровли фундамента в ячейке и новую глубину (рис. 8Б) тех отложений в усредненной ячейке, которые сейчас выходят на дневную поверхность (рис. 8В). Разница между глубиной профиля ячейки на втором этапе и на современном (третьем) давала величину условного неотектонического поднятия кровли фундамента. Все вместе это позволяло, согласно принятой стратиграфической модели, вычислить современную глубину подошвы осадочного чехла и условную высоту кровли размытой части колонны осадков (рис. 8В). По материалам серии профилей можно строить квазитрехмерные модели глубины кровли фундамента, амплитуды размыва верхней части колонны осадков и модели распределения других параметров.

Результаты применения этих методов к трем регионам БК показали сходные результаты в отношении структуры основной полосы линейной складчатости вкрест ее простирания.

Были рассмотрены совместно две тектонические зоны Юго-Восточного Кавказа (Шахдагская и Тфанская) и Чиаурская зона. В структуре, представленной на 13 профилях (2 + 8 + 3) были выделены 262 домена (40 + 156 + 66) и 36 ячеек (5 + 18 + 13). В среднем

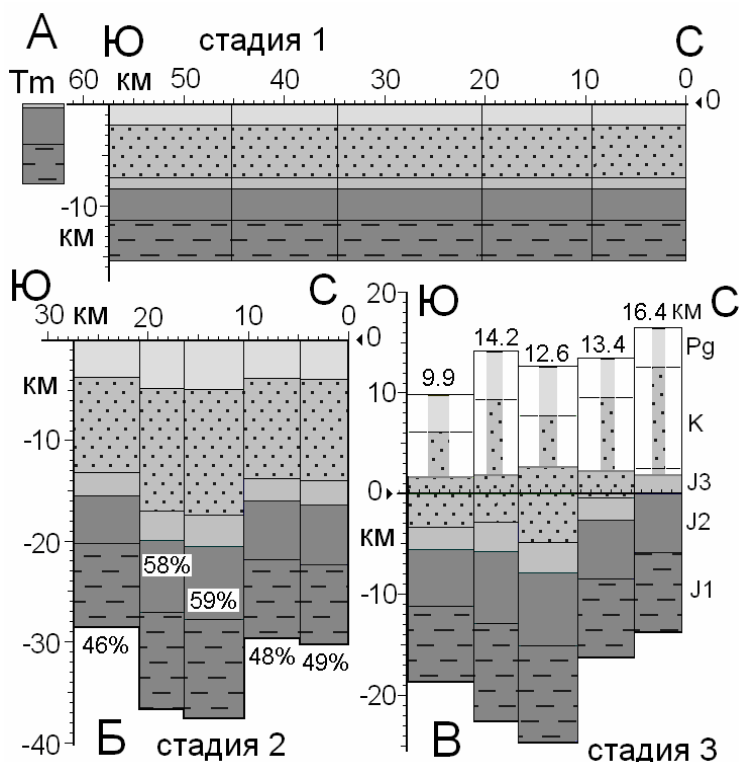


Рис. 8. Порядок восстановления современной структуры по величинам сокращения в структурных ячейках (Чиаурская зона, пять ячеек, профиль см. рис. 1В). Показаны стадия 1 (А) с исходной мощностью чехла и восстановленной шириной ячеек, условная стадия 2 (Б), после складчатости до горообразования с новыми мощностями колонок и величинами сокращения (в %), стадия 3 современная, после горообразования и размыва. На высоту рельефа для каждой ячейки помещены те отложения, которые выходят в природном структурном профиле. Указаны суммарные амплитуды поднятия и размыва кровли осадочного чехла

в пяти ячейках. Тонем серого цвета и крапом показаны отложения трех отделов юрской системы, мела и палеогена. По [Яковлев, 2012] с изменениями. Для профиля А (стадия 1) на юге показана мощность чехла для Закавказского массива (колонка с индексом Тm, мощность 7-8 км). Современная ее мощность не более 9 км.

на каждый домен попадало от 2 до 4 складок. Общая доскладчатая ширина структуры составила 113 км (32 + 24 + 57), а величина укорочения в масштабе тектонических зон, соответственно, равнялась 41%, 53%, 52% при суммарной современной ширине в 57 км. Величины сокращения пространства в масштабе тектонических ячеек по зонам варьировали в пределах 37 ÷ 62% (средн. 49%), 36 ÷ 67% (55%), 46 ÷ 67% (57%). Несмотря на то, что в некоторых пересечениях в сокращении пространства надвиги играют заметную роль (максимальная доля 0.44), в среднем доля надвигов в сокращении невелика (0.13). Глубина кровли фундамента для конца стадии 1 (до формирования складчатости) для этих же зон с севера на юг составляла -9.8 км, -13.4 км (-11.9 ÷ -16.7 для Тфанской зоны) и -15.3 км. После формирования складчатости погружение согласно модели на стадии 2 могло составить, в среднем, соответственно -20 км (-15.6 ÷ -25.8), -31 км (-19.8 ÷ -42.7) и -36.6 км (-28.7 ÷ -45.8). Современная расчетная глубина кровли фундамента после неотектонического поднятия составляет -10.2 км (-7.6 ÷ -13.7), -12.0 км (-4.4 ÷ -19.4) и -20.5 (-13.6 ÷ -26.3). Амплитуда поднятия и размыва кровли осадочного чехла (или разница позиции кровли фундамента между стадиями 2 и 3) составила, также с севера на юг по зонам, для структурных ячеек в среднем 9.6 км (7.2 ÷ 12.5), 19.2 км (12.2 ÷ 24.4) и 16.1 км (9.9 ÷ 22.2). Распределение всех параметров по площади показывает явные закономерные связи со структурой. Поднятыми по современной глубине фундамента оказываются северные ячейки, а опущенными – наиболее южные. Между ячейками наблюдаются уступы в фундаменте амплитудой до 10 км (предположительно, по разрывам). Наибольшие значения размыва приурочены к ячейкам в центре восточной части сооружения БК, имеющим максимальные доскладчатые погружения и максимальные значения сокращения.

Структура Северо-Западного Кавказа, представленная в 11 профилях разной длины, была разбита на 243 домена, которые были объединены в 42 ячейки, максимально – до 5-6 ячеек на профиль. Доскладчатая ширина структуры по неполным пересечениям в центре региона (там, где есть северная граница, но отсутствует южный край структуры) составила 80-85 км (49-55 км современной ширины), а на востоке к югу от ГКР (только для зоны карбонатного флиша J₃-P₂) – 42-47 км (30-35 км современной ширины). По этим данным можно предполагать ширину всего бассейна в центральной части региона около 100 – 120 км, что сопоставимо с аналогичной цифрой для восточной половины Большого Кавказа. Величина сокращения для выделенных 42-х структурных ячеек менялась в широких пределах – 2-10% ÷ 67% при среднем 35%. Наблюдаются слабое сокращение на западной периклинали БК с усилением к центральной части сектора СЗК. Соотношение сокращения по разрывам в общем сокращении меняется в широких пределах, в среднем составляя 0.11. Глубина кровли фундамента для стадии 1 по

структурным ячейкам составляла от -7.3 до -17.3 км, имея тенденцию к увеличению в южных ячейках центральной части СЗК. Средняя глубина составила -13.4 км. В конце гипотетической стадии 2 складчатое расчетное погружение кровли фундамента составляло от -8.7 км до -48.8 км при среднем значении -22.2 км. Современное положение кровли фундамента (стадия 3) имеет значения $-2.2 \div -31.7$ км при средней величине -13.2 км. При этом наблюдаются три части структуры по характеру распределения этого значения: западная с центральным прогибом (профили 1-2), центральная с глубоким погружением южного фланга (профили 3-5) и восточная с центральным прогибом (рис. 9). Гипотетические амплитуды неотектонического поднятия (размыва чехла) менялись от 0 до +22.2 км при среднем значении +8.9 км (рис. 10А). От периклинали эти значения постепенно растут на восток к центральной части, затем несколько уменьшаются, оставаясь далее относительно стабильными. Вкrest простирания значения растут от периферии к центральной оси структуры. Параметр «разница глубин фундамента» (между стадиями 3 и 1) показывает суммарное смещение кровли фундамента в результате формирования складчатости и горообразования. Распределение этого параметра по региону подчеркивает его деление на три части, причем максимальные погружения обычно компенсируются поднятиями в северных частях профилей (рис. 10Б).

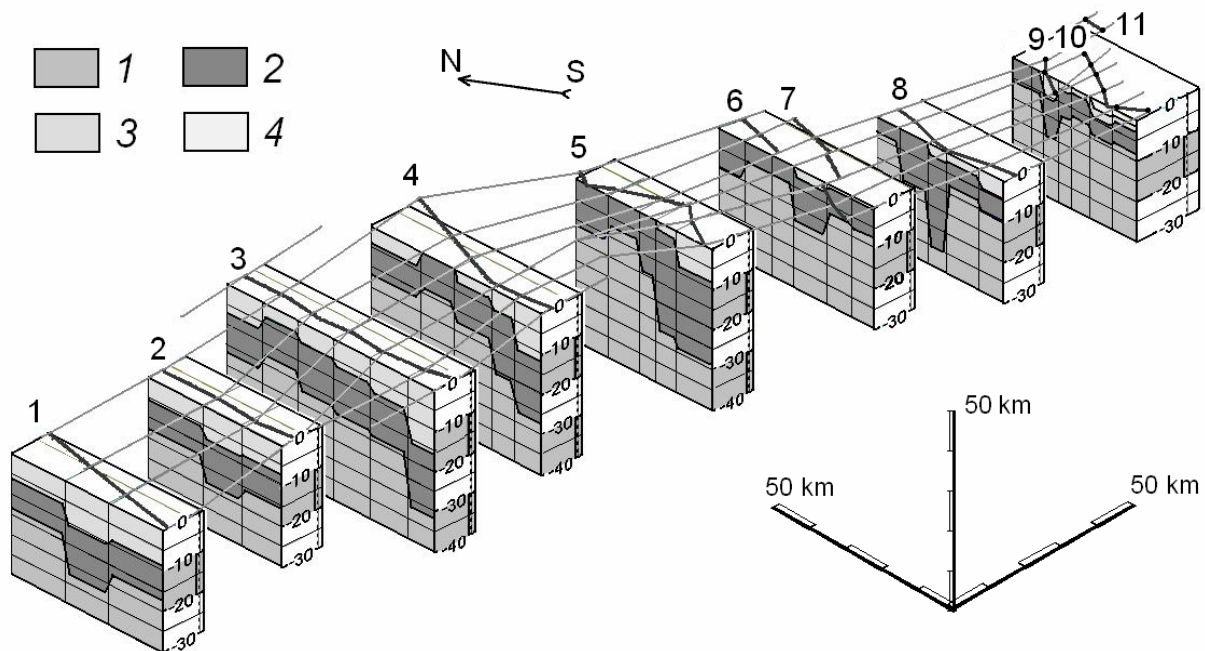


Рис. 9. Посторогенная современная структура мезо-кайнозойского осадочного чехла Северо-Западного Кавказа [Яковлев, 2009; 2010] (стадия 3), показанная в виде квазитрехмерной модели для 42-х структурных ячеек. 1 – палеозойский метаморфический фундамент, 2 – юрские отложения, 3 – отложения мела; 4 – отложения палеоцена и эоцена.

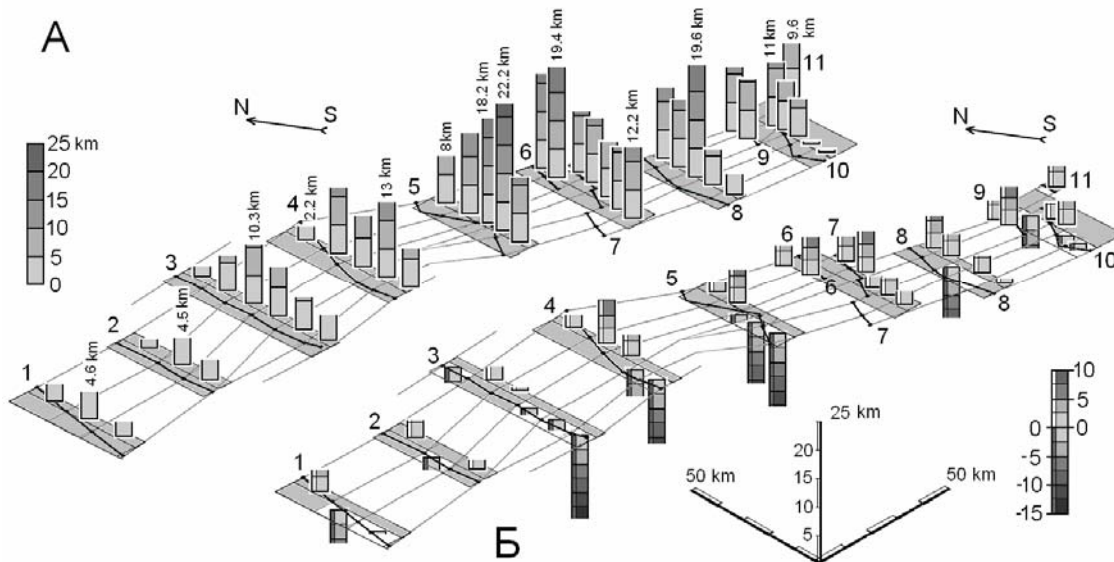


Рис. 10. Распределение по региону СЗК расчетных параметров «неотектонического поднятия» (А) и «разницы глубин фундамента» (Б). Вертикальный масштаб увеличен вдвое.

Материалы определения глубин кровли фундамента на южной границе Большого Кавказа были использованы для рассмотрения геологических аспектов возможности существования «надвигов южного склона» как структур, определяющих основной стиль строения БК. Было показано, что по кровле фундамента Чиаурская зона БК находится глубже соседнего Закавказского массива на 10-12 км (рис. 8, А, В). Эти и другие данные полностью опровергают реалистичность известных схем пододвигания этого массива на север под БК.

В конце главы рассмотрены материалы геофизических исследований строения коры БК [Краснопевцева, 1984; Павленкова, 2012; Шемпелев и др., 2001; Рогожин и др., 2014]. Показано, что определение глубины кровли фундамента встречает сложности, а глубина Мохо надежно найдена только в нескольких точках. Хорошо определены субвертикальные границы блоков коры, принадлежащие Большому Кавказу и Закавказскому массиву. Наличие резкой разницы в строении таких блоков противоречит схемам пододвигания фундамента срединного массива под структуру Большого Кавказа. В ряде случаев показано погружение структур чехла и коры с севера на юг, в том числе – на СЗК, где положение подошвы чехла (от 7 до 25 км) в целом совпадает с нашими расчетными данными.

Глава содержит 112 страниц текста, 57 рисунка и 25 таблиц. Материалы главы, связанные с описанием методик определения величин сокращения и восстановления доскладчатой и современной структур, вошли в **пункт 1 защищаемых положений** (комплекс методов исследования), результаты расчетов по этим методикам образовали **пункт 4 защищаемых положений** (описание характера складчато-разрывной структуры Большого Кавказа).

Глава 7. Диагностика механизмов формирования структур линейной складчатости в масштабе всего осадочного чехла

В первом параграфе рассмотрены различия механизмов формирования разных по объему структур, а также отличия механизмов возникновения разрывов и складок. Указано, что на количественном или полуколичественном уровне можно рассматривать только те теоретические или модельные механизмы, которые могут быть описаны формализованным образом (единообразно). В этом случае можно находить отличия между такими эталонными механизмами, а также находить сходство между моделями и природными структурами.

В следующих параграфах описаны результаты исследования основных типов тех экспериментов по формированию складчатых структур, которые имеют достаточную детальность: Дж. Диксона (с использованием центрифуги, 1991, 2004), В.Г. Гутермана (с использованием центрифуги, 1987), М.А. Гончарова (термическая адвекция, 1979), а также нескольких расчетных кинематических моделей (простейшая математическая модель адвекции [Гончаров, 1976]; модели синтетическая и квазиизгиба [Яковлев, 1987, 2003]. Для анализа механизмов формирования структур профили внутри моделей делились на домены, в которых измерялись те же три параметра морфологии (рис. 2Б) – наклон осевой поверхности складки (AX), коэффициент укорочения перпендикулярно осевой плоскости ($K=L_1/L_0$) и наклон зеркала складки (EN). На примере многостадийных экспериментов [Dixon, Tirrul, 1991] было показано, что взаимное расположение точек замеров доменов на диаграммах рассеяния этих трех признаков (AX/K , EN/K , AX/EN) создает ареалы, типичные для каждого механизма. Увеличение амплитуды механизма (главным образом при возрастании величины укорочения в доменах) ведет к смещению таких ареалов в поле всех трех признаков, показывая тренды развития, отличные друг от друга, что является диагностическими свойствами механизмов. С помощью этих диаграмм было показано, что модели бокового давления Дж. Диксона и В.Г. Гутермана обладают похожими трендами. Были изучены тренды механизмов гравитационного соскальзывания (В.Г. Гутерман), тепловой (аналоговой) адвекции (М.А. Гончаров), простейшей математической модели адвекции (идеальной кинематической) М.А. Гончарова (1976, 1979), синтетической модели (комбинации адвекции с однородным сокращением, [Яковлев, 1997]), квазиизгиба как варианта синтетической модели ([Яковлев, 2003], изгиб в масштабе всего осадочного чехла, а не одного слоя), а также, в одной из моделей В.Г. Гутермана, был найден частный, локальный механизм деформации в наклонной зоне простого сдвига («принадвиговый», [Яковлев, 1997]). Все эти модели на диаграммах рассеяния (AX/K , EN/K , AX/EN)

имеют характерные черты, позволяющие отличать их друг от друга (рис. 11А). Было показано, что дивергентная структура со свойствами общего укорочения пространства может быть создана только синтетической моделью, сочетающую адвекцию и сплющивание (ее частный случай – квазиизгиб). Совокупность деления структурных профилей на домены, замеров трех структурных признаков внутри каждого домена и рассмотрение ареалов точек замеров на диаграммах рассеяния представляет собой язык описания механизмов формирования (деформирования) любой складчатой структуры, относящейся к линейной складчатости. Эти описания явились предметом **пункта 1 защищаемых положений** (метод описания) и **пункта 3** (характеристика конкретных механизмов).

Язык описания механизмов формирования в виде замеров трех структурных признаков использован для характеристики природных структур. Для этого в 151 домене

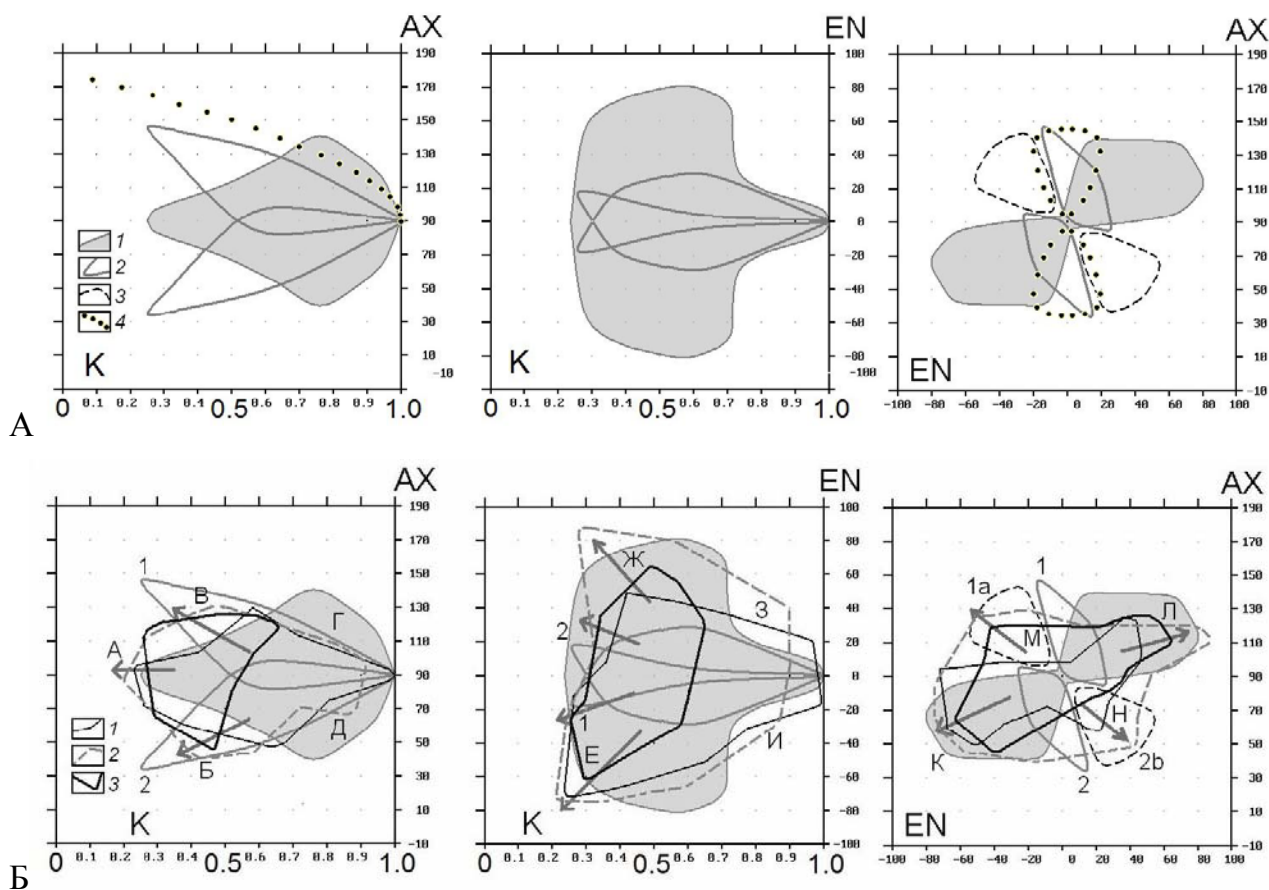


Рис. 11. Полуколичественный метод диагностики механизмов формирования складчатых структур в масштабе осадочного чехла (структурные ячейки и тектонические зоны).

А – контуры основных эталонных механизмов на диагностических диаграммах: 1 – синтетическая модель «адвекция плюс сокращение», серый контур, 2 – принадвиговый механизм (по данным эксперимента), 3 – «принадвиговый» механизм (теоретический контур), 4 – горизонтальное простое сдвигание (показаны для АХ/К – одна и для АХ/EN – обе вергенции).

Б – сопоставление контуров природной складчатости с эталонными механизмами. Тектонические зоны: 1 – Шахдагская зона, 2 – Тфанская зона, 3 – Чиаурская зона.

Шахдагской, Тфанской и Чиаурской тектонических зон восточной половины БК были измерены эти параметры [Яковлев, 1997]. Все три тектонические зоны обладают чертами сходства и отличия между собой (рис. 11, Б, знаки 1-3). Прежде всего, во всех трех зонах крупные части структуры (примерно в ранге структурных ячеек) показывают свойства дивергентной структуры как по наклону зеркала складок, так и по наклону осевых поверхностей. Максимально развитые домены (с наибольшими величинами сокращения в первую очередь) во всех трех зонах находятся в пределах $SH = 80 \div 60\%$ укорочения (или $K = 0.2 \div 0.4$), а конфигурации линий максимального продвижения доменов («фронт» процесса) на диаграммах рассеяния (AX/K, EN/K, AX/EN) оказались очень схожими: по наклону зеркала складок от $+45^\circ \div +80^\circ$ до $-60^\circ \div -80^\circ$, по наклону осевых поверхностей – от 45° до 130° . Наиболее ярким отличием является разная позиция наименее развитых доменов по величине укорочения – в Шахдагской зоне это $SH = 0\%$, в Тфанской – 10% , в Чиаурской – 35% (или $K = 1.0, 0.9, 0.65$). Наблюдается асимметрия структуры в виде заметной концентрации точек по тренду «наклонных зон простого сдвигания» южной вергенции – в Чиаурской зоне, северной вергенции (незначительной) – в Шахдагской и обоих трендов – в Тфанской. Эти наблюдения показывают, что механизм формирования складчатых структур для всех трех зон являлся почти идентичным.

Сопоставление контуров природных зон линейной складчатости на диагностических диаграммах с контурами и трендами ряда эталонных механизмов (рис. 11, Б) не подтвердили возможность реализации распространенной модели аккреционной призмы для объяснения структуры Большого Кавказа – структура в соответствии с моделью должна была обладать свойством моновергентности (рис. 11, А, знак 4 в значениях 90-150 AX), в то время как реальная природная структура является дивергентной. Не подтверждается возможность использования модели чистой адвекции – величины укорочения природных структур в среднем значительно выше, чем в этой модели, а общая конфигурация точек в поле значений «наклон осевых поверхностей / наклон зеркала складок» существенно отличается от модельной. Наиболее удачной является модель синтетическая «адвекция плюс сокращение», которая закрывает в первом приближении поле природных точек во всех трех диаграммах. Оставшиеся свободные пространства природных ареалов попадают на ареалы «принадвигового» механизма. Таким образом, в первом приближении механизм возникновения природной складчатости описывается комбинацией синтетической модели (квазиизгиб) с локальным принадвиговым механизмом. Описание морфологии природных структур и ее сравнение с модельными механизмами, а также вывод о возможном генезисе природной структуры составил предмет второй части **защищаемого положения 3**.

Глава содержит 57 страниц текста, 36 рисунков и 4 таблицы.

Глава 8. О значении полученных результатов для анализа моделей геодинамики Большого Кавказа

В последней главе вынесены на обсуждение дискуссионные проблемы.

Детально обсуждается модель аккреционной призмы (А-субдукции), которая часто привлекается для объяснения происхождения складчатости БК. На основании анализа ряда опубликованных умозрительных моделей, а также моделей экспериментальных (Дж.Диксон, 1991, 2004), показано, что признаками такой модели являются: а) субгоризонтальная поверхность общего detachmenta на глубине около 10 км, б) моновергентная структура по наклонам осевых поверхностей и по наклонам плоскостей смещения надвигов, в) по преобладанию надвигов в общем сокращении структуры, г) выполаживание структуры (по наклонам плоскостей надвигов и осевых плоскостей складок) к поверхности общего detachmenta. Большой статистический материал (замеры геометрии 243 доменов в СЗК) свидетельствует, что реальная структура является дивергентной, соотношение надвигов и сбросов примерно равное по их числу, надвиги имеют слабый вклад в общее сокращение (доля 0.1). Кровля фундамента имеет настолько значительные колебания по глубине (материалы главы б), что проведение общего detachmenta по этой поверхности, необходимого согласно аккреционной модели, невозможно. Указано на совпадение величин пластического сокращения фундамента и чехла, что противоречит основному свойству модели пододвигания (условие жесткого фундамента). На геологической карте южнее ГКР не регистрируются выходы detachmenta рядом с выходами палеозойского фундамента. На этих основаниях модель А-субдукции (аккреционной призмы) отвергается, как не находящая подтверждения в природных данных по комплексу признаков.

Информация о величинах сокращения пространства в масштабах тектонических зон, охватывающего как чехол, так и фундамент, была использована для построения модели строения земной коры и поведения границы Мохо в пределах Большого Кавказа и в соседних блоках коры. Для начала осадконакопления в раннюю юру первоначальная глубина Мохо (М) предполагалась на глубине 40 км (континентальная кора) по условию отложения базальных конгломератов. Последующее погружение этих пород во время накопления осадков (рис. 12А), погружение при сокращении пространства и затем – поднятие при горообразовании, должны были привести к попаданию пород уровня М на глубины 100-110 км (рис. 12Б). Поскольку явление изостазии не могло позволить реализовать попадание на такие глубины пород кристаллической части коры по параметру их относительно низкой плотности, то следует ожидать, что заметная часть коровых пород приобрела плотность пород мантийных. Объем таких преобразованных коровых пород мог

составить в южной части БК до 50-60% от исходного, что заставляет предполагать действие не только изохимических преобразований (переходы типа габбро-эклогит), но и замещения ионов калия и натрия ионами железа и магния с изменением валового химизма пород. Материалы параграфа в защищаемые положения не выносились.

В следующем параграфе обсуждаются связи полученных материалов с проблемами горообразования. Анализируется история развития региона на этапах складкообразования и горообразования, соотношение процессов складчатости и горообразования, рассматриваются возможные механизмы наблюдаемого сводово-глыбового воздымания горного сооружения, и др. Основная обсуждаемая проблема – обнаруженные расчетами очень большие амплитуды размыва верхней части колонны осадков (10 - 15 км) относительно общепринятых амплитуд неотектонического поднятия (3-5 км). Сделано предположение о том, что при возникновении складчатости мог иметь место синхронный

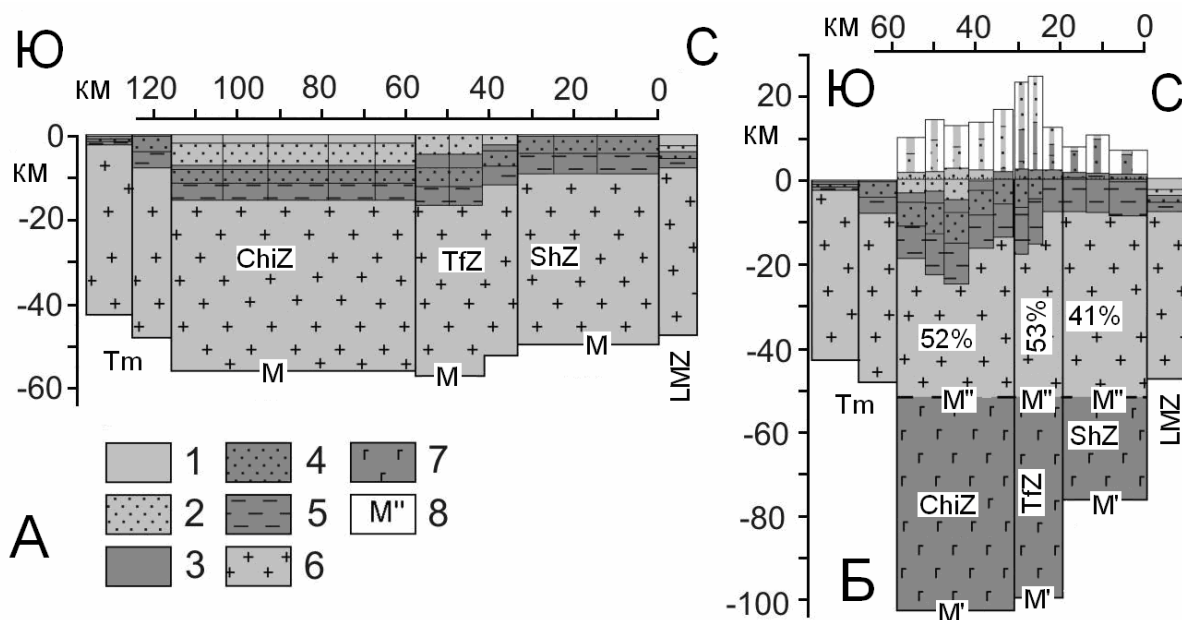


Рис. 12. Гипотетическая обобщенная схема глубокой структуры восточной части Большого Кавказа [Яковлев, 2012] в конце осадконакопления (стадия 1) перед главным эпизодом формирования складчатости (А) и в настоящий момент (стадия 3) после складчатости и горообразования (Б). Показаны величины сокращения для трех тектонических зон (в %, см. также рис. 8 автореферата) и размывы объемы осадочного чехла (+0 ÷ +20 км). ChiZ, TfZ, ShZ, LMZ – Чианурская, Тфанская, Шахдагская, Лабино-Малкинская тектонические зоны. Тm – две структуры Закавказского срединного массива (с севера на юг - Окрибо-Сачхерская зона, Дзирульский блок). Хорошо видно, что кровля фундамента на южной границе Большого Кавказа (Тm / ChiZ) имеет уступ (сброс) амплитудой 10-15 км.

1 – палеоцен и эоцен, 2 – мел, 3 - верхняя юра, 4 – средняя юра, 5 – нижняя юра, 6 – объемы кристаллической части земной коры над Мохо (для стадии 1), 7 – предположительный объем новообразованной мантии, которые были сформированы из погруженной части коры, 8 – граница Мохо: М – граница Мохо при стандартной «континентальной» мощности 40 км для начала отложения осадков (в начале юрского периода), М' - вычисленное положение пород на бывшей границе Мохо, рис. А, М'' – предполагаемое положение современной границы Мохо (над «новой» мантией).

размыв верхней части осадочного чехла. Материал такого размыва мог составить часть объема майкопской толщи (нижняя моласса, P₃-N₁), накопленной в передовых прогибах Большого Кавказа. Обсуждается возможность проверки предлагаемых сбалансированных моделей строения и развития БК (в части амплитуд размыва) по сопоставлению объемов теоретических и реальных кайнозойских отложений в нижней и верхней молассах, накопленных в окружающих депрессиях. В настоящий момент такая проверка не может быть реализована, поскольку нет достаточно полных данных по объемам размывных толщ по площади всего горного сооружения. Кроме того, такая проверка не может быть критически важной, поскольку наиболее достоверная верификация предлагаемых построений возможна только путем проверки логики всех вычислений и прямым повторным пересчетом известных данных. Основанием для такого вывода является приоритет законов логики, геометрии и физики перед любыми умозрительными построениями.

На примере собранных исходных данных и полученных расчётных параметров структурных ячеек СЗК было показано возможное использование предлагаемого подхода для геодинамических исследований (табл. 1). Было показано, что существуют сильные, умеренные и средней силы связи, которые могут иметь генетический смысл. Сильная связь $r=0.79$ найдена для параметров «величина укорочения / амплитуда поднятия» (1/5), умеренная $r=-0.40$ для «укорочение ячеек / разница глубин фундамента» (1/6) и умеренная $r=0.40$ – для «исходные мощности чехла / разница глубин фундамента» (2/6). Эти связи интерпретируются как следующая причинно-следственная последовательность: чем больше исходная мощность, тем больше сокращение, тем больше поднятие и размыв и тем больше результирующее погружение фундамента. Отмечается, что такие связи сильно напоминают классическую схему развития геосинклиналей. Показано (табл. 2), что для двух частей Большого Кавказа наблюдается сохранение постоянной средней величины глубины фундамента от исходной стадии (-13.4 км для СЗК и -13.6 км для

Таблица 1. Матрица корреляций параметров для Северо-Западного Кавказа, для двух совокупностей: для полного набора 42-х ячейки и для выборки 32-х ячеек. Параметры 3 – 6: 3. постскладчатая глубина кровли фундамента (стадия 2); 4. современная глубина кровли фундамента (стадия 3); 5*. амплитуда поднятия (разница, стадии 3 и 2); 6. разница глубин фундамента (между стадиями 3 и 1). (* – измеренные параметры, остальные – вычисленные)

Для 42 ячеек (выборка 32)	1*	2*	3	4	5*	6
1*. коэффициент укорочения	1.000	-0.147 (0.029)	0.011 (-0.701)	-0.353 (-0.418)	0.790 (0.593)	-0.397 (-0.582)
2*. исходная мощность чехла (глубина фундамента, стад. 1)		1.000	0.399 (0.633)	0.755 (0.783)	-0.048 (0.246)	0.395 (0.537)

Таблица 2. Средние значения глубин кровли фундамента и величин неотектонического поднятия для трех стадий развития СЗК (42 ячейки) и трех зон восточной половины Большого Кавказа (37 ячеек)

	Величина укорочения	Доскладч. глубина	Постсклад. глубина	Современ. глубина	Неотект. поднятие	Разница глубин
СЗК	35%	-13.38 км	-22.2 км	-13.25 км	8.9 км	0.13 км
ЮБК и Чиаурская зона	55%	-13.6 км	-31.7 км	-15.1 км	16.6 км	-1.5 км

восточной половины БК) к современной (-13.3 км и -15.1 км), при заметном разбросе как исходных глубин (от -7.3 до -17.3 км и от -9.8 км до -16.7 км), так и современных (от -2.2 км до -31.7 км и от -4.4 до -24.8 км). Эти данные свидетельствуют о сильном влиянии явления изостазии на геодинамику развития складчатости и формирования горного сооружения. Исследование этих данным может составить новое перспективное направление исследований в геодинамике. Показаны результаты первых усилий, предпринятых в этом направлении (В.Г. Трифонов, 2012).

В связи с очень большими амплитудами размыва (до 20 км) обсуждается проблема наблюдаемого слабого метаморфизма пород нижней части осадочного чехла, выходящих на поверхность. Показано, в частности, что явление может быть объяснено возможным очень слабым геотермальным градиентом (10-15°/км). Такой градиент может возникнуть в свете предполагаемого, в соответствии с величинами деформации, сильного погружения (до 100 км, рис. 12, Б) холодной нижней части коры. В этом случае для ожидаемого на глубине 20 км прогрева пород всей колонны литосферных пород потребуется большое время.

Глава содержит 45 страниц текста, 18 рисунков и 4 таблицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ по развитию методологии исследований, созданию методов изучения разномасштабных складчатых структур и применению этих методов к ряду экспериментальных и природных структур были получены следующие результаты.

А. Развитие общей методологии исследований в структурной геологии и тектонофизике

1. Было установлено, что отсутствие методов определения типа и величины деформации в разномасштабных складчатых комплексах внутренних частей складчато-надвиговых систем подвижных поясов является одной из важных причин кризисных явлений в тектонике и геодинамике.

2. Разработана система иерархии объектов линейной складчатости, состоящая минимум из семи уровней, каждый из которых охватывает определенный объем

слоистости: 1. внутрислойные объекты, 2. складки (слои), 3. складчатые домены (крупные пачки слоев), 4. структурные ячейки (весь осадочный чехол), 5. тектонические зоны (земная кора), 6. складчатые системы (литосфера), 7 подвижный пояс. Типы объектов на каждом уровне характеризуются определенной кинематической моделью своего развития, отличающейся от моделей других типов.

3. Основным объектом для исследования складчатых структур крупнее отдельных складок является складчатый домен, объединяющий в себе несколько складок одинаковой морфологии и обладающий достаточно однородной деформацией. Деформация внутри домена описывается тремя геометрическими параметрами, которые соотносятся с эллипсоидом деформаций: наклон осевых поверхностей складок (наклон длинной оси эллипсоида), величина укорочения (длина короткой оси эллипса), наклон зеркала складок (ориентация исходной слоистости). Эти параметры используются как основа языка описания механизмов формирования структур, а также при реализации операций восстановления доскладчатой структуры.

4. Для решения ряда задач по реконструкции геометрии крупных структур за пределами полосы наблюдения использован принцип их последовательного формирования (компиляции) от уровня к уровню с использованием результатов исследования малых и более достоверных структур (дедукция). Показана неэффективность практикуемой методологии создания умозрительных (интерпретационных) моделей конкретных природных складчатых структур на основе известных теоретических построений (индукция).

Результаты 1 – 4 изложены, в основном, в главах 1, 3, 5, 7; они вошли в защищаемое положение 1.

Б. Разработка методов исследований

5. Разработаны методы определения величины укорочения в отдельных складках двух типов: для складок единичного вязкого слоя и для складок пачек слоев. Достоверность результатов обеспечивается использованием в качестве основы первого метода расчетной конечно-элементной модели. Показано путем сопоставления итогов исследования складок в ряде природных структур обоими методами, что кинематическая модель, лежащая в основе второго метода (для складок пачек слоев) дает величины, сопоставимые с данными первой методики, что также подтверждает достоверность всех результатов.

6. Разработан метод восстановления доскладчатой структуры по геометрии домена. Замеры параметров доменов приводятся к исходному состоянию использованием операций поворота, простого горизонтального сдвига и растяжения. В результате исходный отрезок природного профиля, имеющий некоторый наклон,

приобретает новую длину и наклон внутри горизонтально слоистой среды домена. Последовательное объединение доменов позволяет получить структуры из нескольких доменов, как для части пересечения, так и для всего профиля, что дает возможность определять доскладчатую ширину и величину укорочения этих структур.

7. На основе метода восстановления доскладчатой структуры по геометрии домена разработан метод составления сбалансированной структуры всего осадочного чехла для трех стадий развития в масштабе структурных ячеек (для всего осадочного чехла) – на конец осадконакопления, на конец стадии формирования складчатости и для современной посторогенной структуры. Сочетание нескольких соседних профилей позволяет создавать квазитрехмерные модели строения осадочного чехла для этих же трех стадий развития.

8. Разработан метод полуколичественного описания морфологии экспериментальных и природных складчатых структур. Для этого используются геометрические параметры складчатого домена, замеряемые в структурах. Облака точек замеров в трехмерном пространстве анализируются на трех диаграммах рассеяния. Сопоставление ареалов и выявляемых трендов развития позволяет находить черты сходства и различия структур, связанные с механизмами их формирования. Используются сочетания сопоставления структур «модельная/модельная», «природная/природная» и «модельная/природная».

Результаты 5-8 изложены в главах 4 (пункт 5), 6 (пункты 6 и 7), 7 (пункт 8). Они составили предмет части защищаемых положения 1 (комплекс методов исследования).

В. Результаты определения величин укорочения и восстановления сбалансированных профилей.

9. Проведены систематические определения величин укорочения в масштабе отдельных складок для Чиаурской тектонической зоны. Для 72 складок единичного вязкого слоя и для 36 складок пачек слоев величины укорочения менялись от 25% до 83% при средней величине 56%. Была выявлена устойчивость связи величин укорочения с тектонической обстановкой локального уровня (по типу чистого сдвига в терминах механики) внутри крупных складок.

10. Проведены определения величины укорочения для складок внутри зоны базального надвига Воронцовского покрова (39 значений). Для условий простого сдвига (в терминах механики) выявлен очень большой и случайный разброс величин – от 2% до 95%.

11. В масштабе структурных ячеек методом восстановления доскладчатой структуры по геометрии домена были определены величины укорочения от 37% до

67% в 36 ячейках для восточной части Большого Кавказа (Чиатурская, Тфанская и Шахдагская тектонические зоны) со средними значениями сокращения 57%, 55% и 49% и доскладчатой шириной 57 км, 24 км и 32 км соответственно. Величины укорочения для 42 структурных ячеек Северо-Западного Кавказа составили от 2-10% (и растяжение до -10%) до 67% при среднем значении в 35%. Слабое сокращение наблюдается в периклинали сооружения. Доскладчатая ширина всего бассейна осадконакопления Северо-Западного Кавказа достигает 100-120 км при современной полной ширине структуры 50-65 км.

12. Составлены квазитрехмерные модели для трех стадий развития Шахдагской, Тфанской и Чиатурской зон. Глубина кровли фундамента на момент конца доскладчатой стадии для них с севера на юг в масштабе структурных ячеек составляла -9.8 км, -13.4 (от -11.9 км до -16.7 км) и -15.3 км. Расчетная глубина фундамента после складчатости и неотектонического поднятия для стадии 3 (современная) составляет -10.2 км (-7.6 ÷ -13.7), -12.0 км (-4.4 ÷ -19.4) и -20.5 (-13.6 ÷ -26.3). Квазитрехмерные модели для Северо-Западного Кавказа имели для конца доскладчатой стадии глубины кровли фундамента от -7.3 до -17.3 км (среднее -13.4 км). Современное постскладчатое и посторогенное положение кровли фундамента (стадия 3) составляет ряд значений -2.2 ÷ -31.7 км при среднем -13.2 км. При этом наблюдаются три части структуры по характеру распределения этого значения: центральный прогиб на западе, глубокое погружение южного фланга в центре (до -31.7 км) и центральный прогиб на востоке.

13. Определены объемы размытой верхней части осадочного чехла в масштабе структурных ячеек, предположительно связанные с неотектоническим поднятием кровли фундамента между постскладчатой стадией 2 и современной стадией 3. Для Шахдагской, Тфанской и Чиатурской зон эти значения составили в среднем 9.6 км (7.2 ÷ 12.5), 19.2 (12.2 ÷ 24.4) и 16.1 (9.9 ÷ 22.2). Для Северо-Западного Кавказа они менялись от 0 до 22.2 км при среднем значении 8.9 км.

Результаты 9-13 изложены в главах 4 (пункт 9), 5 (пункт 10), 6 (пункты 11 - 13). Они составили предмет защищаемого положения 4.

Г. Результаты диагностики механизмов формирования складчатых структур различного масштаба

14. В масштабе локальных структур в зонах рядом с крупными разрывами с использованием теоретических кинематических моделей и анализа экспериментальных моделей было показано, что Воронцовский покров имеет механизм кинематического простого сдвига; на Северо-Западном Кавказе часть

доменов удовлетворяет модели зоны наклонного простого сдвига («принадвиговый механизм»).

15. С использованием языка описания деформаций (пункт 3 в разделе «А» результатов, см. выше) в масштабе складчатых доменов были охарактеризованы экспериментальные и теоретические механизмы формирования складчатых структур в масштабе структурных ячеек и тектонических зон: боковое давление, гравитационное оползание, диапировые и конвективные структуры; синтетическая модель «адвекция плюс сокращение (сплющивание)», «квазиизгиб» в масштабе осадочного чехла, локальный «принадвиговый механизм». Полученные ареалы и тренды развития структур позволяли отличать эти механизмы друг от друга, что дает возможность проводить диагностику природных структур.

16. С использованием языка описания деформаций были установлены основные черты сходства и различия складчатых комплексов Шахдагской, Тфанской и Чиаурской зон. Показано, что во всех трех зонах крупные части структуры (примерно в ранге структурных ячеек) показывали свойства дивергентной структуры, как по наклону зеркала складок, так и по наклону осевых поверхностей. Домены, имеющие максимальное развитие процессов формирования, во всех трех зонах имеют близкие структурные параметры. Максимальное отличие данных по зонам наблюдалось по величинам сокращения наименее развитых доменов. Было показано, что в первом приближении складчатые структуры кинематически хорошо описываются комбинацией синтетической модели («адвекция плюс сокращение») и наклонными зонами простого сдвига («принадвиговый механизм»).

Результат 14 изложен в главе 5 и вошел в защищаемое положение 2. Результаты 15 и 16 изложены в главе 7. Они составили предмет защищаемого положения 3.

Д. Предварительные результаты применения данных, полученных при использовании многогранного деформационного анализа, для исследования некоторых геодинамических аспектов строения и развития структур альпийского осадочного чехла Большого Кавказа. Возможные направления дальнейших работ

17. На основании установленного факта пластичного деформирования фундамента всего Большого Кавказа, сравнения рельефа кровли фундамента в моделях и в расчетной природной структуре и сопоставления статистических параметров морфологии складчатости моделей и природной структуры сделан вывод, что широко применяемые схемы строения Большого Кавказа, имеющие в своей основе пододвигание жестких блоков коры срединного массива под флишевый

осадочный чехол («А-субдукция» или «аккреционная призма»), не соответствуют реальной природной структуре.

18. Установлено, что накопление большой мощности осадочного чехла и возникновение складчатости связано с масштабными явлениями изменения плотности пород коры (до 60% объема ее кристаллической части) до «мантийных» значений. Это показано геометрическим моделированием на базе установленных величин укорочения по основным тектоническим зонам. Тем самым отрицается корректность использования современной границы Мохо как маркирующей поверхности для определения величин деформаций в геодинамических моделях в областях подвижных поясов.

19. Установлена существенная роль явления изостазии в процессах складкообразования и горообразования. Это доказывается фактами очень близких средних величин доскладчатой и современной глубин кровли фундамента в масштабе структурных ячеек по регионам, а также постоянством средней для профиля величины этого параметра вдоль структуры Северо-Западного Кавказа. Выявленные существенные корреляции между несколькими параметрами структурных ячеек могут быть использованы для дальнейшего исследования геодинамических процессов развития региона.

Результат 17 изложен в главах 6 и 8. Результаты 18 и 19 изложены в главе 8 и представляют интерес в качестве возможных направлений дальнейших работ.

На основании полученных результатов в разделах «А», «Б» и «В» представленная работа характеризуется как новое направление в тектонофизике, структурной геологии и тектонике, называемое «многогранговый деформационный анализ структур линейной складчатости». Результаты в разделах «Г» и «Д» показывают, что в диссертации имеются элементы крупного обобщения по строению и развитию важного региона – альпийского Большого Кавказа.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ

Список ВАКа

1. **Yakovlev, F.L.** Identification of geodynamic setting and of folding formation mechanisms using of strain ellipsoid concept for multi-scale structures of Greater Caucasus / F.L. Yakovlev // *Tectonophysics*. – **2012**. – V. 581, 18. – P. 93–113.
2. **Яковлев, Ф.Л.** Опыт построения сбалансированной структуры восточной части альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости / Ф.Л. Яковлев // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. – **2012**. – № 1. – С. 191-214.
3. **Yakovlev, F.L.** Methods for detecting formation mechanisms and determining a final strain value for different scales of folded structures / F.L. Yakovlev // *Comptes Rendus Geoscience*. – **2012**. – 344 (3–4). – P. 125–137.
4. **Яковлев, Ф.Л.** Деформационный многограновый анализ и структурные парагенезы: сравнение подходов и результатов / Ф.Л. Яковлев // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. – **2010**. – № 2. – № 16. – С. 179-193.
5. **Яковлев, Ф.Л.** Реконструкция структур линейной складчатости с использованием объемного балансирования / Ф.Л. Яковлев // *Физика Земли*. – **2009**. – №. 11. – С. 1023–1034.
6. **Яковлев, Ф.Л.** Многограновый деформационный анализ структур линейной складчатости / Ф.Л. Яковлев // *Доклады Академии Наук*. – **2008**. – т. 422, № 3. – С. 371–376.
7. **Яковлев, Ф.Л.** Большой Кавказ – коллизионная структура с внутренней активностью / Ф.Л. Яковлев // *Бюлл. МОИПа, отд. геол.* – **2006**. – Т.81, вып. 1. – С. 89-90.
8. **Яковлев, Ф.Л.** Исследование механизма образования линейной складчатости как одно из направлений тектонофизики / Ф.Л. Яковлев // *Бюлл. МОИПа, отд. геол.* – **2001**. – Т.76, вып. 4. – С. 7-15.
9. **Яковлев, Ф.Л.** Исследование кинематики линейной складчатости (на примере Юго-Восточного Кавказа) / Ф.Л. Яковлев // *Геотектоника*. – **1987**. – № 4. – С. 31-48.
10. **Яковлев, Ф.Л.** К вопросу о факторах складкообразования / Ф.Л. Яковлев // *Геотектоника*. – **1987**. – № 4. – С. 124-125.
11. Рогожин, Е.А. Опыт количественной оценки морфологии складчатости Тфанской зоны Большого Кавказа / Е.А. Рогожин, **Ф.Л. Яковлев** // *Геотектоника*. – **1983**. – № 3. – С. 87-98.
12. **Яковлев, Ф.Л.** Оценка деформаций в складчатой области по дисгармоничным складкам / Ф.Л. Яковлев // *Бюлл. МОИП, отд. геол.* – **1978**. – Т.53(5). – С. 43-52.

Монографические публикации

13. **Яковлев, Ф.Л.** Поля тектонических напряжений и поля деформаций Воронцовского покрова (Северо-Западный Кавказ) / Ф.Л. Яковлев, А.В. Маринин, Л.А. Сим, П.П. Гордеев // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В.Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: сб. научн. работ. – М.: Изд. ИФЗ РАН, **2008**. – С. 319–333.
14. **Яковлев, Ф.Л.** Первый вариант трехмерной модели строения осадочного чехла Северо-Западного Кавказа по данным поля складчатых деформаций / Ф.Л. Яковлев // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В.Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: сб. науч. работ. – М.: Изд. ИФЗ РАН, **2008**. С. 335–345.
15. **Яковлев, Ф.Л.** Количественные методы анализа природных механизмов формирования складок и систем линейной складчатости / Ф.Л. Яковлев // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В.Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: сб. науч. работ. – М.: Изд. ИФЗ РАН, **2008**. – С. 149–188.
16. Ребецкий, Ю.Л. Тектонофизика / Ю.Л. Ребецкий, А.В. Михайлова, Д.Н. Осокина, **Ф.Л. Яковлев** // Планета Земля. Энциклопедический справочник. : Том «Тектоника и геодинамика» : Ред. Л.И. Красный, О.В. Петров, Б.А. Блюман. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, **2004**. – С. 121–134.
17. **Яковлев, Ф.Л.** Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа) / Ф.Л. Яковлев. – М.: ОИФЗ РАН, **1997**. – 76 с.

Статьи в журналах и сборниках вне списка ВАКа

18. **Яковлев, Ф.Л.** Тектонофизические методы оценки величины конечной деформации для структур линейной складчатости разного ранга: примеры решения геотектонических задач / Ф.Л. Яковлев // «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН.». Материалы конференции. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, **2009**. – т. 1. – С. 133-146.
19. **Яковлев, Ф.Л.** Квазитрехмерная трехстадийная модель альпийского развития складчатого осадочного чехла Северо-Западного Кавказа по данным о величинах деформаций / Ф.Л. Яковлев // «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН.»: материалы конференции. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, **2009**. – Т. 1. – С. 439-448.
20. **Яковлев, Ф.Л.** Тектонофизические методы изучения структур линейной складчатости / Ф.Л. Яковлев // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы первой молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ РАН, **2009**. – С. 318-347.

21. **Яковлев, Ф.Л.** Опыт типологии разрывов в структурах линейной складчатости на примере Большого Кавказа / Ф.Л. Яковлев // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: материалы науч. совещ. – Иркутск: ИЗК СО РАН, **2009**. – С. 128-131.
22. **Яковлев, Ф.Л.** Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости / Ф.Л. Яковлев // Геофизические Исследования. – **2008**. – т. 9, № 1. – С. 56-75.
23. **Яковлев, Ф.Л.** Исследования процессов и механизмов развития пликативных деформаций в земной коре (обзор существующих методических подходов) / Ф.Л. Яковлев // Тектонофизика сегодня: сб. науч. работ. – М.: ОИФЗ РАН, **2002**. – С. 311-332.
24. **Яковлев, Ф.Л.** Исследование кинематических характеристик линейной складчатости на примере Большого Кавказа / Ф.Л. Яковлев // Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика : материалы науч. совещания. – Киев: Наукова думка, **1991**. – С. 181-186.
25. **Яковлев, Ф.Л.** Две методики определения размера горизонтального сокращения по морфологии складок / Ф.Л. Яковлев // Математические методы анализа геологических явлений: сб. науч. работ. – М.: Наука, **1981**. – С. 70-76.

Зарубежные журналы вне списка ВАК

26. Saintot, A. The Mesozoic–Cenozoic tectonic evolution of the Greater Caucasus / A. Saintot, R. Stephenson, M.-F. Brunet, M. Sébrier, **F. Yakovlev**, A. Ershov, F. Chalot-Prat, T. Mccann // Ed.: D.G. Gee, R.A. Stephenson. – European Lithosphere Dynamics. – Geological Society, London, Memoirs, **2006**. – 32. – P. 277–289.